2534.

W. I. CHOMICZ

ferrytowe anteny odbiorcze

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE

Najprostszą anteną magnetyczną jest ramka — zwój przewodu elektrycznego o długości mniejszej od długości fali. Napięcie na jej zaciskach uwarunkowane jest powierzchnią ramki, tzn. powierzchnią objętą przez zwój. Ujemną cechą ramki jest jej mała, w porównaniu z dipolem elektrycznym, wysokość skuteczna. Jeśli na przykład dipol o ogólnej długości 2 m „zwiniemy" w okrągłą ramkę, to jej wysokość skuteczna dla fali $\lambda = 30$ m będzie 15 razy mniejsza od wysokości skutecznej dipola.

Wprowadzenie do ramki rdzenia magnetycznego polepsza właściwości odbiorcze ramki ponieważ wtedy wzrasta w niej strumień magnetyczny. Do niedawna jednak jeszcze stosowanie anten z rdzeniami magnetycznymi było ograniczone wskutek niskiej jakości rdzeni i wzrostu strat w antenie. Pojawienie się nowych materiałów magnetycznych — ferrytów — umożliwiło polepszenie odbiorczych właściwości anten magnetycznych i zmniejszenie ich wymiarów.

Rozdział 1

WŁAŚCIWOŚCI FERRYTÓW I ELEMENTY ANTENY FERRYTOWEJ

1. Fizyczne właściwości ferrytów

Pojawienie się ferrytów poprzedził długi okres doskonalenia materiałów magnetycznych, których historia sięga daleko wstecz.

Odkrycie i przemysłowe zastosowanie prądu zmiennego w ubiegłym stuleciu zrodziły zapotrzebowanie na specjalne materiały zdolne do wytwarzania potężnych pól magnetycznych. Takim materiałem okazało się żelazo i jego stopy. Wprowadzenie telegrafu i telefonu, wykorzystujących słabe prądy elektryczne o większych częstotliwościach, wysunęło nowe wymagania w stosunku do materiałów magnetycznych, a datujący się od kilkudziesiątków lat rozwój radiotechniki spowodował konieczność dalej idącego polepszenia właściwości materiałów magnetycznych.

Odpowiednio do narastających wymagań ze strony techniki doskonalono materiały magnetyczne. Od pełnych rdzeni magnetycznych przerzucano się na rdzenie płytkowe, wstęgowe i drutowe, a to w celu zmniejszenie strat na prądy wirowe.

Innym sposobem zmniejszenie strat w rdzeniach okazało się zastosowanie dielektryków magnetycznych — materiałów, w których cząstki rozdrobnionej substancji ferromagnetycznej są rozdzielone dielektrykiem. Do tego rodzaju materiałów należą powszechnie znane alsifer i żelazo karbonylkowe. Przez pewien okres czasu wykorzystywano do wyrobu dieletryków magnetycznych również proszek rudy magnetycznej, czyli magnetyt (ferryt żelaza).

Pomimo jednak uzyskiwanych osiągnięć — materiały magnetyczne do niedawna (orientacyjnie do 1946 r.) nie mogły spełnić żądań wysuwanych przez elektronikę. Dopiero pojawienie się ferromagnetyków tlenkowych, łączących właściwości magnetyczne z dużą opornością właściwą, utorowało drogę dalszemu rozwojowi materiałów magnetycznych. Badania ferrytów doprowadziły do

odkrycia szeregu ich nowych właściwości, co też wpłynęło na powstanie nowych elementów konstrukcyjnych.

Właściwości ferrytów można wyjaśnić w oparciu o ich siatkę krystaliczną o ściśle określone rozmieszczenie atomów (jonów) substancji, gdyż od tego pod wieloma względami zależą fizyczne właściwości materiałów: twardość, kruchość itd. Kryształ ferrytu żelaza ma kształt sześcianu; atomy żelaza i tlenu umieszczone są w narożach sześcianu. Atomy te są ściśle związane siłami wewnętrznego przyciągania zarówno między sobą, jak i z sąsiednimi kryształami. W krystalicznej siatce ferrytu żelaza atomy dwuwartościowego żelaza można zastąpić atomami innych metali, jeśli są one dwuwartościowe i mają średnicę orientacyjnie równą średnicy atomów żelaza; w tym bowiem przypadku sześcienna siatka krystaliczna w nowym materiale zostanie utrzymana.

Najbardziej dogodne do zastąpienia atomów żelaza są atomy następujących metali: manganu, magnezu, cynku, miedzi, niklu i kobaltu.

Magnetyczne właściwości ferrytów zależą od postaci atomów metalicznych „zastępców" oraz od ich geometrycznego rozmieszczenia w siatce krystalicznej. Istotnie, jeśli zamienimy w ferrycie żelaza część dwuwartościowych atomów żelaza atomami cynku, to jego przenikalność magnetyczna gwałtownie wzrośnie, przewodność zaś zmaleje.

Większość wytwarzanych przez przemysł ferromagnetyków tlenkowych stanowi mieszaninę ferrytów — twarde roztwory dwóch lub więcej prostych ferrytów.

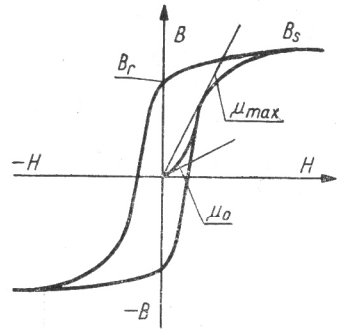
Technologia wytwarzania rdzeni z ferrytów mało się różni od technologii wytwarzania wyrobów z ceramiki. Istnieją dwie metody przygotowania mas ferrytowych. Jedna polega na wytworzeniu mieszaniny tlenków metali, druga — mieszaniny roztworów soli. Według pierwszej metody tlenki metali zostają wymieszane w określonym stosunku, sprasowane w cegiełki i wstępnie wypalane w temperaturze 800 ÷ 1100°C. Według drugiej metody wymieszane roztwory soli zostają odparowane, wyżarzone (w celu otrzymania mieszaniny tlenków), a następnie — tak samo jak w metodzie pierwszej — sprasowane w cegiełki i wypalone. Druga metoda umożliwia otrzymanie lepszych magnetycznych charakterystyk materiałów o mniejszym rozrzucie technologicznym.

Cegiełki, które przeszły przez wstępne wypalanie, zostają następnie przemielone na proszek w młynach kulowych lub wibracyjnych. Proszek ten po przesianiu ulega prasowaniu. W prasowaną masę wprowadza się plastyfikator (spirytus poliwinylowy, parafinę) w ilości zależnej od technologii dalszej obróbki materiału: przy przeciąganiu i odlewaniu dodaje się 10 ÷ 15% spirytusu poliwinylowego, przy prasowaniu zaś 6 ÷ 8%. Temperatura ostatecznego wypalania wyrobów z ferrytów zależy od typu ferrytu i wynosi

900 ÷ 1400°C. Wypalanie ferrytów odbywa się zazwyczaj w utleniającej atmosferze, ale ferryty manganowe wypala się w atmosferze neutralnej — w próżni.

Zależnie od technologii wytwarzania kurczenie się rdzeni z ferrytów przy wypalaniu może osiągnąć 15%. Niewielkie odchylenia temperatury wypalania zmieniają zarówno właściwości elektryczne i magnetyczne ferrytów, jak i wielkość ich skurczu. Dla uzyskania zatem rdzeni o jednorodnych właściwościach i wymiarach w granicach tolerancji ustalone warunki wypalania powinny być ściśle dotrzymane. Ferryty prawie się nie poddają obróbce mechanicznej, można je obrabiać tylko przez szlifowanie na przykład za pomocą korundu.

Ferryty zaliczają się do klasy półprzewodników i zależnie od składu i technologii wytwarzania mogą mieć oporność właściwą od 10^2 do 10^8 Ω/cm. Magnetyczne materiały metalowe mają zaś oporność rzędu (10 — 15). 10^{-6} Ω/cm.



Rys. 1. Krzywa magnesowania i pętla histerezy ferrytu

Dzięki dużej oporności właściwej cewki z rdzeniami ferrytowymi mogą mieć bardzo dużą dobroć, przekraczającą 500 przy małych częstotliwościach (rzędu kilku kiloherców) i 300 przy częstotliwościach 500 ÷ 1000 kHz.

Przenikalność magnetyczna ferrytu zależy od składu chemicznego oraz struktury materiału i może być rzędu kilku tysięcy gausów na ersted (Gs/Oe) — (tabl. 1).

Znane są ferryty o przenikalności 7000 Gs/Oe. Należy zaznaczyć, że znak fabryczny ferrytu zazwyczaj wskazuje wartość jego przenikalności. Ferryt o przenikalności magnetycznej 600 ma zatem znak F-600. Bardzo ważną właściwością ferrytów jest utrzymanie dużej przenikalności w szerokim zakresie częstotliwości (zmniejszanie się przenikalności ferromagnetyków metalicznych w miarę wzrostu częstotliwości zależy od ich grubości).

Na rys. 1 przedstawiono podstawową charakterystykę materiału magnetycznego — pętlę histerezy, wskazującą zależność indukcji B od natężenia pola magnetycznego H. Wartość przenikalności ma-

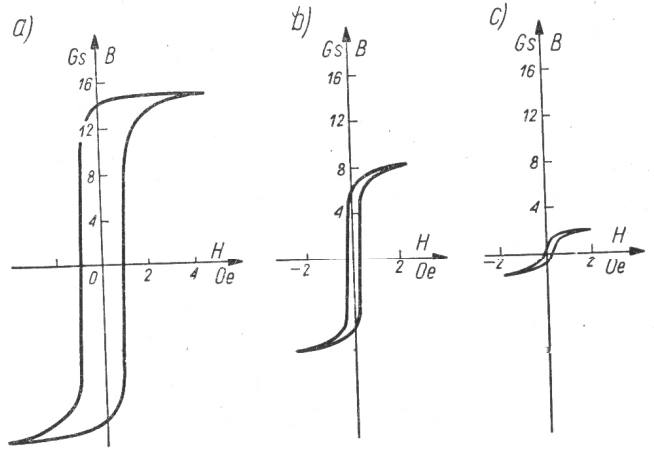
Tablica 1

Wartości charakterystycznych wielkości niektórych typów ferrytów

Parametry	Typ ferrytów						
	F-20	F-100	F-400	F-600	Oksyfer 1000	Oksyfer 2000	Oksyfer 3000
Przenikalność początkowa μ_0 (Gs/Oe)	20 ÷ 25	1000	400	600	800 ÷ 1200	1800 ÷ 2400	2600 ÷ 3500
Przenikalność maksymalna μ_{max} (Gs/Oe)	80 ÷ 1000	150 ÷ 200	—	3000	3000 ÷ 3500	6000 ÷ 7000	5000 ÷ 6000
Indukcja nasycenia B_s (Gs)	2200 ÷ 2400	2700	—	2700 ÷ 2900	2900	2300	3200
Temperaturowy współczynnik przenikalności $\cdot 10^{-6}$	+330	+1300	+700	+3400	+8300	+8000	+3150
Częstotliwość graniczna f_{gr} (MHz)	80	15	7	4	2	0,7	0,9

Uwaga: Podane tu współczynniki temperaturowe były mierzone w zakresie temperatur od 20 do 60 °C. Jako wzorce były stosowane we wszystkich przypadkach pierścienie ferrytowe.

gnetycznej μ określa się jako tangens kąta nachylenia stycznej do krzywej magnesowania i zmienia się w zależności od pola magnesującego w znacznych granicach. Dla ferrytów stosowanych w antenach odbiorczych największą wartość ma początkowa przenikalność magnetyczna μ_0 — przenikalność materiału przy bardzo małych wartościach pola magnesującego. Powierzchnia pętli histerezy charakteryzuje magnetyczne straty materiału, B_r — indukcję szczątkową, B_s zaś — indukcję nasycenia. Wysoka wartość stosunku $\frac{B_r}{B}$ jest istotna dla przekaźników magnetycznych stosowanych w maszynach matematycznych i w magnetycznych wzmacniaczach. μ_{max} to maksymalna przenikalność magnetyczna, której wartość jest



Rys. 2. Krzywe histerezy: a) stali transformatorowej; b) permaloju; c) ferrytu

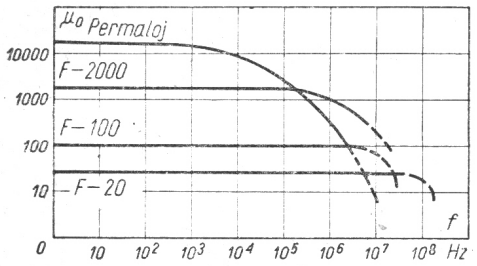
bardzo istotna jeśli chodzi o transformatory generatorów linii, dławiki i inne urządzenia pracujące przy dużych natężeniach pola.

Na rys. 2 przedstawiono typowe krzywe histerezy podstawowych materiałów magnetycznych (stali transformatorowej, permaloju i ferrytu) stosowanych w elektrotechnice. Krzywe te charakteryzują podstawowe właściwości wymienionych materiałów. W szczególności dla ferrytu są charakterystyczne stosunkowo małe wartości przenikalności magnetycznej μ i indukcji nasycenia B_s oraz prawie zupełny brak indukcji szczątkowej B_r.

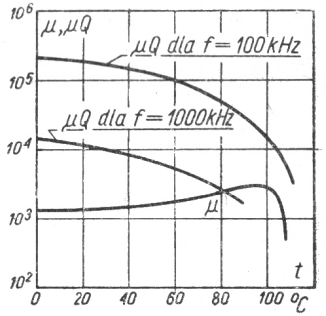
Wskutek dużej oporności właściwej ferrytów straty w nich na prądy wirowe — praktycznie biorąc — nie występują, powierzchnia pętli histerezy jest mała i przeważają w nich straty na opóźnienie magnetyczne („lepkość" magnetyczną) wzrastające wraz

z częstotliwością. Częstotliwość, przy której przenikalność zaczyna się zmniejszać, a straty gwałtownie wzrastać, nazywa się częstotliwością graniczną lub krytyczną. Na rys. 3 przedstawiono krzywe zależności przenikalności magnetycznej różnych materiałów magnetycznych od częstotliwości.

Przenikalność dielektryczna ferrytów ma z reguły dużą wartość tylko przy małych częstotliwościach: od kilku tysięcy (dla niklowo-cynkowych) do dziesiątków tysięcy (dla manganowych). Charakterystyczną cechą przenikalności dielektrycznej ferrytów jest jej zależność od częstotliwości, mianowicie gwałtowne zmniejszanie się przy wzroście częstotliwości (do wartości 10 ÷ 20).



Rys. 3. Zależność przenikalności magnetycznej ferrytu od częstotliwości



Rys. 4. Zależność iloczynu μQ oraz μ od temperatury

Podstawową wadą ferrytów są ich duże temperaturowe współczynniki przenikalności [1]), gdyż punkt Curie [2]) takich materiałów jest stosunkowo bliski temperatur pokojowych. Charakterystyczną cechą ferrytów jest wzrost współczynników temperaturowych odpowiednio do wzrostu przenikalności magnetycznej (rys. 4).

2. Rdzenie anten magnetycznych, ich wybór i charakterystyki

Właściwości ciał magnetycznych pod wieloma względami zależą od ich kształtu. Dane o przenikalności magnetycznej, zestawione w tablicy 1, charakteryzują przenikalność początkową μ_0 rdzeni toroidalnych (pierścieniowych). Rdzenie anten ferrytowych mają kształt wydłużony, tzn. ich długość znacznie przekracza grubość, szerokość lub średnicę. Druga wyróżniająca właściwość rdzeni antenowych polega na występowaniu szczeliny między ich końcami

[1]) Temperaturowym współczynnikiem przenikalności nazywa się względna wielkość zmiany przenikalności przy zmianie temperatury o 1°C.

[2]) Punktem Curie nazywa się temperatura, powyżej której materiał traci właściwości magnetyczne.

(biegunami). Przenikalność magnetyczna takich ciał zależy od stosunku między długością a powierzchnią przekroju rdzenia.

Zależność ta została objaśniona w oparciu o samą istotę magnetyzmu. W ciele magnetycznym pod wpływem pola magnesującego następuje zmiana orientacji magnetycznych momentów cząstek w taki sposób, że dodatnie bieguny zostają przemieszczone w kierunku pola zewnętrznego, ujemne zaś — w kierunku przeciwnym. Zorientowane cząstki tworzą dodatkowe pole magnetyczne przeciwdziałające polu zewnętrznemu. Wielkość pola dodatkowego lub rozmagnesowującego określona jest wymiarami ciała: im ciało jest krótsze w porównaniu z wymiarami poprzecznymi, tym większy jest wpływ pola rozmagnesowującego. Obliczenie wpływu tego pola jest stosunkowo proste tylko dla rdzeni elipsoidalnych i może być określone przez wprowadzenie współczynnika rozmagnesowania N, zależnego od stosunku dużej osi elipsoidy do małej. Wartość współczynnika rozmagnesowania zmienia się od 0 (dla elipsoidy nieskończenie długiej) do 1 (dla dysku). Przenikalność magnetyczna ciała z uwzględnieniem jego kształtu i wymiarów nazywa się przenikalnością skuteczną μ_e. Przenikalność ta, mierzona w jednostkach względnych, wskazuje, ile razy zwiększa się gęstość strumienia magnetycznego w danym ciele w porównaniu z gęstością strumienia w próżni. Przenikalność skuteczną elipsoidy wyraża się następującym wzorem:

$$\mu_e = \frac{\mu_0}{1 + \frac{N}{4\pi}(\mu_0 - 1)}$$

W praktyce rdzenie anten mają przeważnie kształt różniący się od elipsoidy (kształt walca, równoległościanu lub pryzmatu). Poprawkę uwzględniającą kształt rdzenia można wyznaczyć albo z krzywych doświadczalnych, przedstawiających zależność $\mu_e = f\left(\frac{l}{d}\right)$ (rys. 5), albo z tablic (tabl. 2), lub też ze wzorów empirycznych. Dobre wyniki daje na przykład wzór

$$\mu_e = \frac{\mu_0}{1 + 0{,}84\left(\frac{d}{l}\right)^{1{,}7}(\mu_0 - 1)}$$

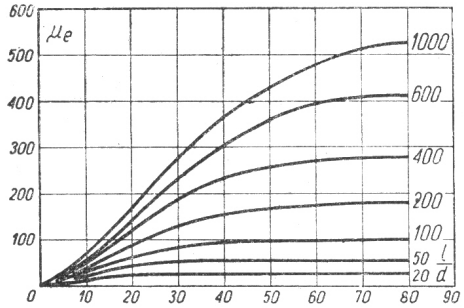
w którym d — średnica rdzenia walcowego,
l — jego długość.

Wybór typu ferrytu uzależniony jest od przeznaczenia anteny i roboczego zakresu częstotliwości. Do tego zagadnienia będziemy jeszcze niejednokrotnie wracali.

Praktycznie biorąc uważa, się, że dla anten zakresu długofalowego najbardziej celowe jest stosowanie rdzeni typu F-600 albo F-1000, dla zakresu zaś fal średnich — F-400 lub F-600.

W antenach dla zakresu krótkofalowego najlepiej stosować rdzenie o przenikalności początkowej rzędu 100 ÷ 200 Gs/Oe, zaś w antenach dla zakresu ultrakrótkofalowego — rzędu 15 ÷ 25 Gs/Oe.

Kształt przekroju rdzenia odgrywa znacznie mniejszą rolę w porównaniu ze stosunkiem jego podłużnych i poprzecznych wymiarów lub w porównaniu z rodzajem materiału. Zazwyczaj obiera się go w oparciu o względy konstrukcyjne. Najczęściej stosuje się rdzenie o przekroju okrągłym, rzadziej prostokątnym (rdzenie z blachy), a jeszcze rzadziej o przekroju w postaci prawidłowych wielobo-



Rys. 5. Zależność skutecznej przenikalności magnetycznej μ_e rdzenia od stosunku $\frac{l}{d}$

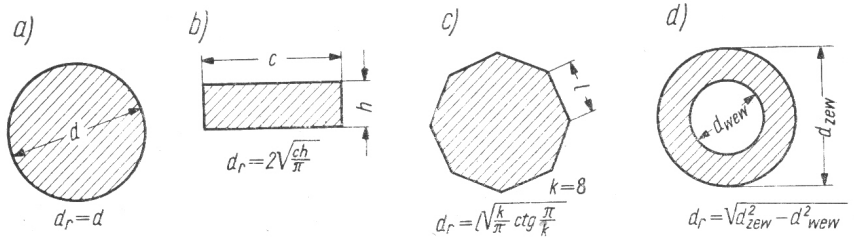
ków (rdzenie pryzmatyczne). Można stosować również rdzenie rurkowe. Sprawa polega na tym, że rozkład strumienia magnesującego wzdłuż średnicy może być nierównomierny, pociąga to za sobą niedostateczne wykorzystanie materiału magnetycznego w wewnętrznych częściach rdzenia. Stąd właśnie wynika celowość stosowania rdzeni rurkowych: mało skuteczne części magnetyczne przewodu rdzenia zostają wyłączone.

Tablica 2

Dane liczbowe do wyznaczania poprawek uwzględniających kształt rdzenia antenowego

$\frac{l}{d}$	μ_e dla rdzeni o przenikalności początkowej			
	$\mu_0 = 5$	$\mu_0 = 10$	$\mu_0 = 100$	$\mu_0 \geqslant 200$
1	2,25	3,0	3,2	3,5
2	3,3	4,6	6,5	8
3	3,85	6,0	10	12
4	4,2	6,7	15	18
5	4,35	7,2	20	24
6	4,5	7,8	25	31
8	4,7	8,3	34	37
10	4,8	9,1	41	> 63
15	4,85	9,4	52	>> 78
20	4,9	9,6	60	> 95

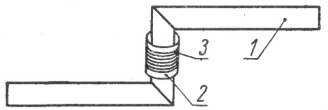
Przy obliczeniach przenikalności skutecznej wszystkie rodzaje przekroju rdzeni anten ferrytowych zostają sprowadzone do typu okrągłego. Wzory dla obliczeń średnicy d_r równoważnego pod względem powierzchni koła podane są na rys. 6.



Rys. 6. Przekroje i równoważna średnica rdzenia: a) cylindrycznego; b) płaskiego; c) pryzmatycznego; d) rurkowego

Niekiedy zachodzi konieczność stosowania rdzeni „łamanych", do których należy na przykład rdzeń typu Z (rys. 7). Umożliwia on (w celu pozbycia się zakłóceń) zmianę położenia anteny bez zmiany położenia cewki. Rdzeń o takim kształcie można uzyskać przez sklejenie oddzielnych części — poziomych i pionowych — klejem БФ lub żywicą epoksydową. Stykające się powierzchnie rdzeni powinny być oszlifowane i sklejone zgodnie z ogólnie przyjętą tech-

Rys. 7. Antena z rdzeniem typu Z: *1* — rdzeń; *2* — korpus; *3* — cewka



nologią. Przy sklejaniu należy zwrócić uwagę na temperaturę, w jakiej rdzeń zostaje wysuszony, aby nie osiągnęła punktu Curie.

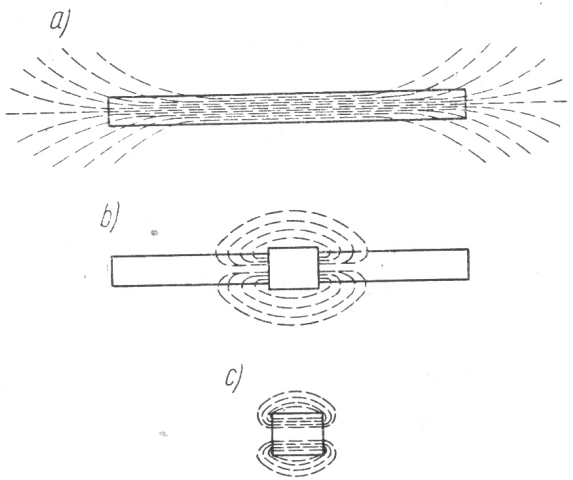
Oprócz temperatury na właściwości magnetyczne rdzeni wpływają silne stałe pola magnetyczne. Należy to uwzględniać przy szlifowaniu rdzenia, często bowiem umocowuje się elementy na szlifierkach za pomocą silnych magnesów. Namagnesowanie rdzeni powoduje zauważalny wzrost strat. Przy obróbce rdzeni trzeba pamiętać, że ferryty pod względem swych właściwości mechanicznych podobne są do ceramiki i mogą ulec złamaniu przy nieostrożnym obchodzeniu się z nimi.

3. Właściwości cewek antenowych

Cewka antenowa jest niezbędnym elementem anteny ferrytowej. Na rys. 8 przedstawiono schematyczny obraz pola zewnętrznego zmienionego pod wpływem wprowadzonego rdzenia ferrytowego

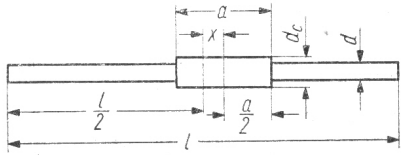
oraz wewnętrznego pola cewki antenowej. Związek wzajemny obu pól rzutuje na odbiorcze właściwości samej anteny.

Cewka anteny ferrytowej wykonana jest zazwyczaj jako wielozwojowa. Jest ona częścią (odgałęzieniem indukcyjnym) obwodu



Rys. 8. Pola magnetyczne anteny ferrytowej: a) zewnętrzne pole magnetyczne (pole zniekształcone przez rdzeń magnetyczny); b) wewnętrzne pole magnetyczne (linie sił cewki antenowej); c) pole cewki bez rdzenia

wejściowego. Jej właściwości elektryczne są wyrażone indukcyjnością L i dobrocią Q — wielkością określającą straty cewki i zależną od stosunku oporności indukcyjnej dostrojonej cewki do jej oporności czynnej. Obie te wielkości L i Q zależą od właściwości



Rys. 9. Geometryczne wymiary anteny ferrytowej

rdzenia: od jego przenikalności magnetycznej i strat magnetycznych, od względnego rozmieszczenia cewki i rdzenia itd. Na rys. 9 podano najbardziej istotne wymiary geometryczne dotyczące umieszczenia cewki.

Zastosowanie rdzenia ferrytowego w cewce antenowej powoduje wzrost jej indukcyjności. Indukcyjność L_0 (w henrach) cewki antenowej bez rdzenia oblicza się ze wzoru

$$L_0 = w^2 d_c \Phi \cdot 10^{-9}$$

w którym:

w — ilość zwojów,

d_c — średnica cewki [cm],

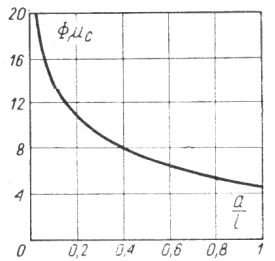
Φ — stała, zależna w zasadzie od stosunku średnicy cewki do jej długości.

Wartość Φ oblicza się przy $0{,}25 < \frac{a}{d_c} < 1{,}3$ ze wzoru

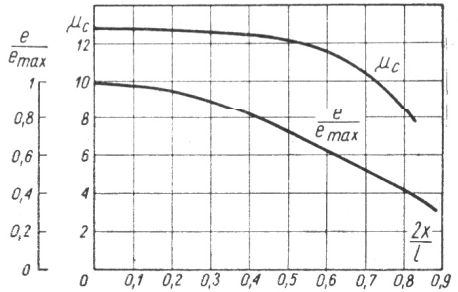
$$\Phi = 1 + 6\frac{d_c}{a},$$

w którym a oznacza długość cewki.

Indukcyjność cewki antenowej z rdzeniem ferrytowym zwiększa się tyle razy, ile wynosi współczynnik μ_c. Współczynnik μ_c określa zmianę oporności magnetycznych na drodze strumienia magnetycznego, która nastąpiła w cewce indukcyjnej przy wprowadzeniu rdzenia. Oporność magnetyczna w wewnętrznej części drogi strumienia magnetycznego w cewce bez rdzenia przewyższa oporność



Rys. 10. Zmiana iloczynu $\Phi\,\mu_c$ przy względnym zwiększeniu długości antenowej cewki ferrytowej

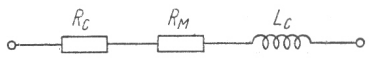


Rys. 11. Zmiana $\frac{e}{e_{max}}$ i μ_c przy zmianie stosunku $\frac{2x}{l}$

w części zewnętrznej orientacyjnie $6 \div 10$-krotnie (w zależności od konstrukcji cewki). Wprowadzenie rdzenia do wnętrza cewki zmniejsza wybitnie oporność części wewnętrznej; oporność ta staje się tak mała, że można ją pominąć w porównaniu z opornością części zewnętrznej. Zgodnie z tym zmienia się również wartość współczynnika μ_c — w zależności od początkowej przenikalności magnetycznej rdzenia, jego rozmiarów oraz konstrukcji cewki — w granicach od 5 do 12. Zatem indukcyjność cewki z rdzeniem przewyższa indukcyjność cewki bez rdzenia $5 \div 12$-krotnie.

Na rys. 10 przedstawiono zmianę wartości iloczynu $\Phi\,\mu_c$ średniofalowej anteny ferrytowej przy względnym zwiększeniu długości

cewki dla $l = 200$ mm; $d = 8$ mm; $\mu_0 = 200$ i $w = 30$. Na wartość μ_c (a więc również na indukcyjność cewki) wpływa położenie cewki na rdzeniu — im cewka jest dalej odsunięta od środka rdzenia, tym mniejsza jest indukcyjność (rys. 11). Często korzysta się z tej zależności przy regulowaniu indukcyjności cewki antenowej. Chociaż pod względem konstrukcji regulacja taka jest wygodna, to jednak należy mieć na uwadze, że przy odsunięciu cewki od środka rdzenia zmniejsza się strumień magnetyczny w przekroju rdzenia (wskutek nierównomierności pola w rdzeniu), co powoduje zmniejszenie



Rys. 12. Schemat równoważny cewki antenowej ferrytowej

się wzbudzanej w cewce SEM e w porównaniu do SEM e_{max} przy umieszczeniu cewki w środku (rys. 11).

Dobroć cewki antenowej decyduje w znacznej mierze o odbiorczych właściwościach anteny ferrytowej. Dobroć cewki jest wprost proporcjonalna do wartości napięcia w obwodzie wejściowym pod warunkiem, że nie ma dodatkowych źródeł strat w obwodzie.

Równoważny schemat cewki antenowej (rys. 12) można przedstawić w postaci szeregowo połączonych: czynnej oporności uzwojenia R_c oporności strat magnetycznych R_M oraz indukcyjności L. Dla zwykłych anten ferrytowych $R_c \ll R_M$, wobec czego dobroć cewki określona wzorem

$$Q = \frac{2\pi fL}{R_c + R_M} \approx \frac{2\pi fL}{R_M}$$

zależy w zasadzie od właściwości magnetycznych rdzenia.

Straty w rdzeniach magnetycznych można wyrazić wzorem, który wyjaśnia w pewnej mierze szerokie zastosowanie ferrytów w dziedzinie wielkich częstotliwości

$$R_M = b\,\mu\,f^2\,L + a\,\mu\,f\,B\,L + c\,\mu\,f\,L$$

gdzie: L — indukcyjność cewki [H],
f — częstotliwość [Hz],
b — współczynnik prądów wirowych, odwrotnie proporcjonalny do oporności właściwej,
a — współczynnik histerezy, zależny od powierzchni pętli histerezy,
c — współczynnik zależny od opóźnienia magnetycznego materiału.

Ponieważ wielkości b i a są w ferrytach małe, przeto i oporność ogólna strat jest również mała. Podany wyżej wzór może być stosowany tylko dla zakresu częstotliwości mniejszych od krytycznej,

od której począwszy zaczynają szybko maleć zarówno przenikalność magnetyczna, jak i dobroć materiału. Za częstotliwość krytyczną przyjmuje się częstotliwość, przy której dobroć maleje do 10.

Wybitny fizyk rosyjki W. A. Arkadjew, który badał właściwości materiałów magnetycznych, jeszcze w r. 1912 twierdził, że w materiałach magnetycznych oprócz prądów wirowych działają również inne czynniki powodujące wzrost strat i zmniejszanie się przenikalności magnetycznej. Pierwszym z tych czynników jest tzw. rezonans domenowy. Domenami w materiale magnetycznym nazywają się obszary, w których momenty magnetyczne cząstek elementarnych mają wyraźnie określoną kierunkowość. Granicą między domenami (ścianką domeny) nazywa się obszar, w którym kierunek momentów magnetycznych przechodzi w kierunek drugiej domeny. Wskutek bezwładności, działania sił występujących w kryształach (elastyczności) oraz występowania strat ścianka domeny może zacząć rezonować na określonej częstotliwości, na podobieństwo obwodu składającego się z R, L i C, albo też mogą wystąpić drgania relaksacyjne w przypadku dużych strat. Na zewnątrz rezonans przejawi się w postaci absorpcji energii (wzrostu strat).

Drugim z czynników jest rezonans ferromagnetyczny, który powstaje, gdy częstotliwość doprowadzonego pola zmiennego jest zgodna z częstotliwością tzw. precesji. Elektrony substancji oprócz krążenia wzdłuż orbity obracają się również dokoła swej osi. Moment magnetyczny tego obrotu jest w ogólnym przypadku skierowany dowolnie. Przy działaniu na elektron stałego pola magnetycznego powstaje precesja — stosunkowo powolny obrót momentu magnetycznego.

Zauważono również, że przy działaniu poprzecznego pola magnetycznego na płytkę ferrytową umieszczoną w falowodzie określone rodzaje fal zostają wchłonięte przez płytkę, tzn. że część energii fal zużywa się na podtrzymanie precesji. Inne fale rozprzestrzeniają się w falowodzie bez strat. Zjawiska te najbardziej jaskrawo występują w przypadku zgodności częstotliwości precesji i częstotliwości pola. Jak widać, jeden i ten sam materiał cechują odmienne właściwości dla różnie spolaryzowanych fal. Częstotliwość precesji jest zależna od stałego pola. Zazwyczaj obserwuje się to zjawisko przy częstotliwościach rzędu kilku tysięcy megaherców, gdy materiał zostanie nasycony przez doprowadzone do niego silnego magnetycznego pola stałego. Rezonans występuje w postaci gwałtownego wzrostu strat i zmiany wartości przenikalności dla pól o określonej polaryzacji. Zjawisko rezonansu ferromagnetycznego, ściślej mówiąc — zależność częstotliwości rezonansu od wielkości doprowadzonego pola stałego, znajduje szerokie wykorzystanie w zakresie mikrofal.

Rezonans wymiarowy powstaje w rdzeniach o wymiarach odpowiadających połowie długości fali elektromagnetycznej. Takie zjawisko może w szczególności powstać w ferrytach manganowo-cynkowych, dla których przenikalność magnetyczna osiąga wielkość 1000, przenikalność zaś dielektryczna 100 000. Rezonans ten występuje — jak w uprzednio opisanych przypadkach — w postaci wzrostu strat.

W. K. Arkadjew zaproponował, by przenikalność magnetyczną ciała (w danym przypadku cewki antenowej z rdzeniem ferrytowym) wyrażano w postaci wielkości zespolonej

$$\mu = \mu' + j\,\mu''$$

gdzie część rzeczywista μ' odzwierciedla przenikalność magnetyczną ciała, μ'' zaś straty, łącznie ze stratami na promieniowanie. Przy takim podejściu, do rozpatrywania przenikalności magnetycznej można wyprowadzić szereg ciekawych właściwości anten magnetycznych. Wielkość μ'' zostaje wyznaczona bezpośrednimi pomiarami jako iloczyn przenikalności magnetycznej ciała i tangensu kąta strat

$$\mu'' = \mu' \operatorname{tg}\delta \approx \mu \frac{R_M}{\omega L}$$

Za pomocą tego wyrażenia otrzymano wzory określające w szczególności zależność całkowitej oporności anteny i jej dobroci od parametrów rdzenia i uzwojenia. Istotnie, czynna oporność anteny z rdzeniem w postaci elipsoidy oraz z cewką nawiniętą na styk wzdłuż całej długości, wyraża się wzorem

$$R_M = \omega\,\mu_p\,w^2\,\frac{S\,\Phi}{10a}\,\frac{\mu''(1-N)}{[1+N(\mu'-1)]^2}$$

w którym μ_p oznacza przenikalność powietrza; dobroć zaś dla małych anten — wzorem

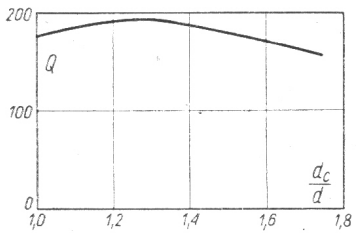
$$Q = \frac{\mu'[1+N(\mu'-1)]}{\mu''(1-N)}$$

Rozpatrzmy bardziej szczegółowo różne odmiany uzwojeń stosowanych w cewkach antenowych. Konstrukcja cewki wpływa w znacznym stopniu na właściwości anteny. Przy wyborze uzwojenia należy brać za podstawę ilość zwojów, zakres pracy anteny, wymiary rdzenia i średnicę stosowanego przewodu.

Dla zakresu długo- i średniofalowego stosuje się najczęściej nawijanie przylegające na styk (zwój do zwoju), jednowarstwowe (przy średnicach rdzenia do 10 mm), jednak bardziej korzystne (lecz również wymagające większego wkładu pracy) jest nawijanie rozsunięte o skoku równomiernym lub narastającym. Takie nawijanie jest możliwe przy małej liczbie zwojów (nie większej niż 30) i dostatecznie dużej średnicy rdzenia. Nawijanie rozsunięte stosuje się również w cewkach krótkofalowych, zwłaszcza w przypadku anten ultrakrótkofalowych.

Niekiedy cewkę antenową dzieli się na sekcje. Ma to na celu zarówno wygodę przy przełączaniu zakresów fal, jak i uzyskanie maksymalnej skuteczności anteny ferrytowej. Bardziej szczegółowe informacje o obliczaniu sekcjonowanych cewek antenowych podane są w następnym rozdziale.

Konstrukcja cewki antenowej (jej długość i średnica) wpływa istotnie na jej dobroć. Przy zwiększaniu średnicy cewki nie zmieniając rozmiaru rdzenia oraz ilości zwojów dobroć cewki z początku wzrasta, następnie osiąga pewne maksimum, po czym maleje (rys. 13). Zwiększenie średnicy cewki antenowej powoduje jednocześnie pewne zmniejszenie się przenikalności skutecznej rdzenia μ_e, które można obliczyć ze wzoru



Rys. 13. Zmiana dobroci cewki antenowej średniofalowej przy względnym zwiększeniu średnicy korpusu

$$\mu_e' = \frac{D_{śr}^2}{d^2}(\mu_e - 1) + 1$$

w którym: $D_{śr}$ — średnia średnica uzwojenia cewki antenowej,
d — średnica rdzenia.

Zwiększenie długości cewki powoduje zazwyczaj również pewne zmniejszenie jej dobroci.

Korpus cewki dla anten długo- i średniofalowych wykonuje się najczęściej z preszpanu. Dla zakresu fal krótkich, a zwłaszcza ultrakrótkich, należy stosować na korpusy materiały o małych stratach, jak na przykład polistyren lub fluoroplast.

Wybór przewodu cewki antenowej okazuje się rzeczą bardzo ważną w przypadku nawijania przylegającego na styk (zwój do zwoju). Zastosowanie do cewek zakresu średnio- i długofalowego skrętki $9 \times 0{,}7$ polepsza dobroć Q o $150 \div 200\%$ w porównaniu ze zwykłym miedzianym przewodem emaliowanym. Przy nawijaniu ze skokiem $1{,}5 \div 2$ mm rodzaj użytego przewodu wywiera nieznaczny wpływ na dobroć cewki.

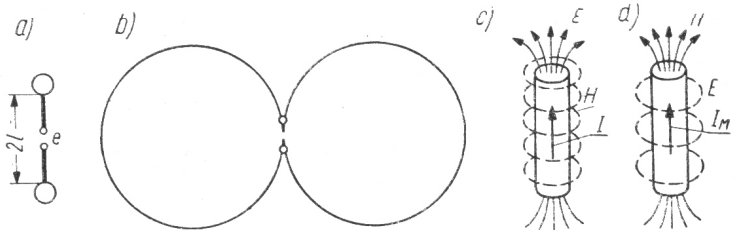
Ciekawą cechą cewek anten ferrytowych jest to, że utrzymują stałą wartość iloczynu $\mu_e Q$ w całym roboczym zakresie częstotliwości. Cecha ta ułatwia wybór parametrów cewki, jak to dalej udowodnimy. Jednakże poza granicami roboczego zakresu częstotliwości wartość iloczynu μQ zmniejsza się w miarę wzrostu częstotliwości.

Rozdział 2

PROJEKTOWANIE I BUDOWA FERRYTOWYCH ANTEN ODBIORCZYCH

1. Właściwości ferrytowych anten odbiorczych

Antena odbiorcza przekształca energię pola elektromagnetycznego na drgania elektryczne, wzmacniane dalej przez odbiornik. Jakość tego przekształcania może być oceniona „skuteczną wysokością" h anteny, współczynnikiem łączącym natężenia pola elektrycznego E z wartością SEM e wytwarzanej przez antenę. Sku-



Rys. 14. Anteny podstawowe: a) dipol Hertza; b) charakterystyka kierunkowa dipola Hertza; c) idealny dipol elektryczny, d) idealny dipol magnetyczny

teczna wysokość zależy od stosunku wymiarów geometrycznych anteny do długości fali odbieranej; wyraża się ją w jednostkach długości.

Klasycznym modelem najprostszej anteny jest dipol Hertza (rys. 14a). Skuteczna wysokość dipola Hertza równa się jego długości $2l$, a zatem SEM anteny określa prosty wzór

$$e = E h = 2 l E$$

Zdolność dipola do odbioru fal radiowych jest niejednakowa dla różnych kierunków co ilustruje charakterystyka kierunkowa (rys. 14b) wskazująca stosunek SEM anteny wzbudzonej przez falę z danego kierunku do maksymalnej SEM wzbudzonej przy odbio-

rze z kierunku głównego. Główne kierunki odbioru przez dipol Hertza znajdują się w płaszczyźnie równikowej, tzn. w płaszczyźnie prostopadłej do osi dipola i przechodzącej przez jego środek (rys. 14b).

Struktura pola elektrycznego i magnetycznego elementarnego dipola elektrycznego uwidoczniono na rys. 14c.

Wobec tego, że wszystkie wielkości elektryczne (prąd, napięcie, natężenie pola) mają swoje odpowiedniki magnetyczne, można podać również odpowiednik dipola elektrycznego — idealny dipol magnetyczny (rys. 14d). Z porównania pola dipola magnetycznego z polem dipola elektrycznego widać, że symbole E i H zamieniły się miejscami, zamiast zaś rzeczywistego prądu I został przedstawiony na rysunku magnetyczny prąd przesunięcia.

Różnica między anteną elektryczną a magnetyczną występuje wyraźnie przy porównaniu ich oporności promieniowania. Oporność promieniowania oznacza moc promieniowania anteny nadawczej pod warunkiem, że prąd i napięcie na wejściu anteny są zadane.

Oporność ta związana jest ze skuteczną wysokością anteny prostym wzorem

$$R_\Sigma = 20\,(m\,h)^2$$

w którym:

$$m = \frac{2\pi}{\lambda}$$

λ — długość fali.

Podstawiając do tego wzoru wartość skutecznej wysokości anteny ferrytowej, można wywnioskować, że jej oporność promieniowania wynosi zaledwie ułamkowe części oma, gdy tymczasem oporność promieniowania anten elektrycznych osiąga wartość dziesiątków omów (w przypadku wibratora półfalowego wynosi ona 73 Ω).

Jednak strata oporności promieniowania zostaje częściowo wyrównana właściwościami rezonansowymi anteny ferrytowej, co w ostatecznym rachunku prowadzi do zwiększenia prądu w cewce antenowej lub napięcia na jej zaciskach.

Skuteczna wysokość anteny ferrytowej określa wielkość strumienia magnetycznego w rdzeniu i stopień objęcia cewki antenowej tym strumieniem. Zgodnie z tym do wzoru określającego wysokość skuteczną wchodzą następujące wielkości: skuteczna przenikalność rdzenia μ_e, powierzchnia przekroju rdzenia S, długość fali roboczej λ oraz ilość zwojów w cewki antenowej, a więc:

$$h_s = \frac{2\pi\, w\, S}{\lambda}\,\mu_e$$

Jak już wyżej stwierdzono, cewkę antenową wykorzystuje się jako indukcyjność obwodu wejściowego, który przyłącza się zazwyczaj bezpośrednio do wejścia odbiornika. Najlepsze rezultaty zapewnia antena ferrytowa wówczas, gdy w pierwszym stopniu odbiornika będzie zastosowana lampa elektronowa. W tym przypadku, jeśli oporność wejściowa lampy R_{wej} przewyższa znacznie równoważną oporność obwodu R_r, a więc nie wywiera bocznikującego wpływu na obwód (czyli gdy jest spełniony warunek $R_{wej} \gg R_r$), napięcie w obwodzie zwiększa się Q_0 razy. Za pomocą wielkości Q_0 ocenia się jakość obwodu wejściowego, którą w zasadzie określa dobroć cewki Q. W ten sposób obwód wejściowy odgrywa rolę transformatora SEM wzbudzanej w antenie.

Często dla oznaczenia sumarycznego działania anteny i obwodu wejściowego uciekamy się do pojęcia „sprowadzonej wysokości skutecznej" lub „skuteczności anteny ferrytowej"; określa się ją wzorem

$$h'_s = h_s\, Q_0$$

Wyrażenie h'_s umożliwia — przy znanej wartości natężenia pola magnetycznego — obliczenie wartości napięcia U_{wej} na siatce sterującej lampy wejściowej ze wzoru

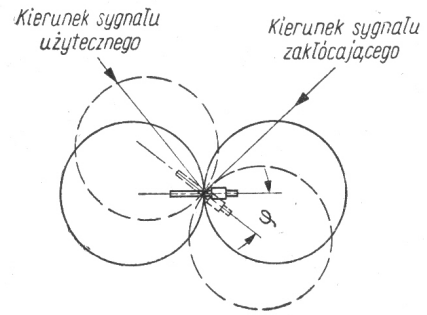
$$U_{wej} = E\, h'_s$$

Korzystając z powyższych wzorów można dokonać porównania anten odbiorczych, w szczególności dwóch najbardziej rozpowszechnionych typów anten pokojowych: zwykłego przewodu pionowego o długości 2 m oraz anteny ferrytowej wbudowanej w odbiornik, której rdzeń ma długość 200 mm, średnicę 15 mm i przenikalność początkową $\mu_0 = 200$. Przyjmijmy dobroć cewki anteny ferrytowej równą 200 ($w = 75$; $\mu_e = 70$; $L_0 = 0{,}8$ mH). Obliczenia porównawczego dokonamy przy częstotliwości 1 MHz ($\lambda = 300$ m).

Parametr	Przewód pionowy	Antena ferrytowa
Współczynnik wzmocnienia obwodu wejściowego	3	200
Wysokość skuteczna	2 m	0,02 m
Skuteczność	6 m	4 m
Napięcie na siatce lampy przy $E = 100\ \frac{\mu V}{m}$	600 μV	400 μV

Jak widać antena ferrytowa ustępuje nieco pod względem skuteczności przewodowi pionowemu o długości 2 m, jest ona jednak niezaprzeczalnie bardziej skupiona. Oprócz skupienia wykazuje antena ferrytowa szereg innych cennych zalet. Duża dobroć obwodu wejściowego, w którym znajduje się cewka anteny ferrytowej, zapewnia dobrą selektywność częstotliwościową dla odbioru sygnałów, zmniejszając zakłócenia od stacji sąsiednich. Szerokość przepuszczanego pasma (pasmo częstotliwości, w którym zmniejszenie mocy nie przekracza 2) może być wyznaczona jako wynik

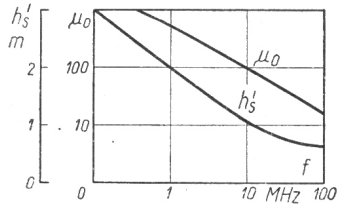
podzielenia wartości częstotliwości przez dobroć. W danym przypadku ($f = 1$ MHz) szerokość przepuszczalnego pasma wynosi 5 kHz, przy dziesięciokrotnym zaś zmniejszeniu mocy — 40 kHz. Wąskie pasmo przepuszczanie na wejściu odbiornika sprzyja lepszej ochronie przed zakłóceniami pochodzenia przemysłowego (rozładowania prądu elektrycznego, zakłócenia impulsowe itd.) o szerokim widmie częstotliwościowym. Duża selektywność anteny ferrytowej umożliwia w szeregu przypadków zrezygnowanie z wzmacniacza wielkiej częstotliwości w odbiorniku, gdyż zakłócenia na częstotliwościach lustrzanych są silnie osłabione.



Rys. 15. Wybiorczość przestrzenna anteny ferrytowej

Niemniej cenną zaletą anteny ferrytowej jest możliwość realizowania przestrzennej wybiorczości anteny przez zmianę jej kierunku. Charakterystyka kierunkowa anteny magnetycznej w płaszczyźnie poziomej, przedstawiona na rys. 15, ma kształt „ósemki" dla fal o polaryzacji normalnej. Jeśli w szczególnym przypadku działa na antenę oprócz sygnału użytecznego jeszcze sygnał zakłócający z innego kierunku, to obracając antenę o określony kąt φ można znacznie osłabić sygnał zakłócający.

Interesujące są właściwości częstotliwościowe anten ferrytowych. Wzrost strat w przypadku ferrytów o dużej wartości μ przy wzroś-



Rys. 16. Zmiana przenikalności początkowej μ_0 oraz skuteczności h'_s anten ferrytowych przy różnych częstotliwościach

cie częstotliwości powoduje konieczność wykorzystania (w celu utrzymania dostatecznie dużych wartości Q) ferrytów o mniejszej przenikalności. Na rys. 16 przedstawiono krzywe zmniejszanie się przenikalności magnetycznej w miarę wzrostu częstotliwości — w przypadku ferrytów stosowanych na rdzenie anten w zakresie częstotliwości radiowych. Zmniejszenie się przenikalności zmniejsza oczywiście i wysokość skuteczną anten ferrytowych. Ujemnej tej tendencji przeciwstawia się jednak inna — przy stałych i małych w porównaniu z λ wymiarach geometrycznych polepszają się

właściwości odbiorcze anteny w miarę wzrostu częstotliwości. Ostatecznie, jak udowadnia to praktyka, można stosować anteny ferrytowe bez widocznego obniżenia ich skuteczności wszędzie, poczynając od zakresu fal długich i kończąc na ultrakrótkich (metrowych) — (rys. 16).

2. Układy wejściowe z antenami ferrytowymi

Przy wyborze układu wejścia powinno się uwzględniać konieczność osiągnięcia maksymalnej wysokości skutecznej i utrzymania maksymalnej dobroci oraz sposób dopasowania anteny do następnych stopni odbiornika radiowego, jak również brać pod uwagę rolę i zadanie anteny i urządzenia odbiorczego w całości. Na przykład, w przenośnych odbiornikach turystycznych podstawową rolę odgrywają względy konstrukcyjne, natomiast w przypadku dużych odbiorników gabinetowych chodzi o uzyskanie maksymalnej skuteczności anteny.

Antena, jak wiadomo, oddaje maksymalną moc wówczas, gdy jej oporność wewnętrzna jest równa oporności obciążenia. Z tego punktu widzenia należałoby dołożyć starań, aby oporność obwodu wejściowego R_r była równa wejściowej oporności lampy R_{wej}. Jeśli jednak traktujemy lampę jako wzmacniacz napięcia, to będzie celowe zwiększenie napięcia w obwodzie wejściowym, chociażby moc oddawana przy tym przez obwód, a więc również przez antenę, była mniejsza od możliwej. Za warunek maksymalnego napięcia w obwodzie należy uważać nierówność

$$R_{wej} \gg 3\,R_r$$

Przy małej oporności wewnętrznej lampy dobroć obwodu wejściowego, a więc również współczynnik wzmocnienia tego obwodu, znacznie maleją. Tak jest zazwyczaj w zakresie fal krótkich, a zwłaszcza ultrakrótkich, gdzie oporność wejściowa lampy, podawana w katalogach dla jakiejś określonej częstotliwości, na przykład 60 MHz, zaczyna się zmniejszać odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości. Jeśli zatem R_{wej} lampy typu 2Ж 27л przy częstotliwości 60 MHz wynosi 15 kΩ, to przy częstotliwości 30 MHz będzie ona równa 60 kΩ, a przy częstotliwości 90 MHz — zaledwie 6,66 kΩ.

Dopasowanie wejścia lampy do obwodu następuje przy niepełnym przyłączeniu obwodu. Na rys. 17 przedstawiono rozmaite układy przyłączania anten: autotransformatorowy, indukcyjny, pojemnościowy i wreszcie układ pełnego przyłączenia anteny. Każdy z nich wykazuje pewne zalety. Przyłączenie autotransformatorowe jest wygodne w zastosowaniu wówczas gdy są dokładnie znane wartości oporności wejściowej R_{wej} stopnia oraz równo-

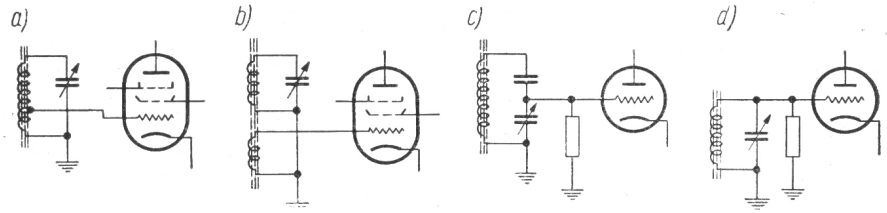
ważnej oporności R_r obwodu. W tym przypadku liczbę zwojów cewki antenowej w_s, z których zostaje podawane napięcie na siatkę, można obliczyć ze wzoru

$$w_s = \sqrt{\frac{R_{wej}}{3R_r} w^2}$$

w którym: R_r — równoważna oporność obwodu wejściowego; równa $Q\varrho$ lub $Q\omega L$

w — liczba wszystkich zwojów cewki antenowej.

Sprzężenie indukcyjne jest bardziej giętkie. Umożliwia ono, poprzez zmianę indukcyjności wzajemnej między cewką sprzęgającą a cewką antenową (na drodze przesuwania cewki sprzęgającej



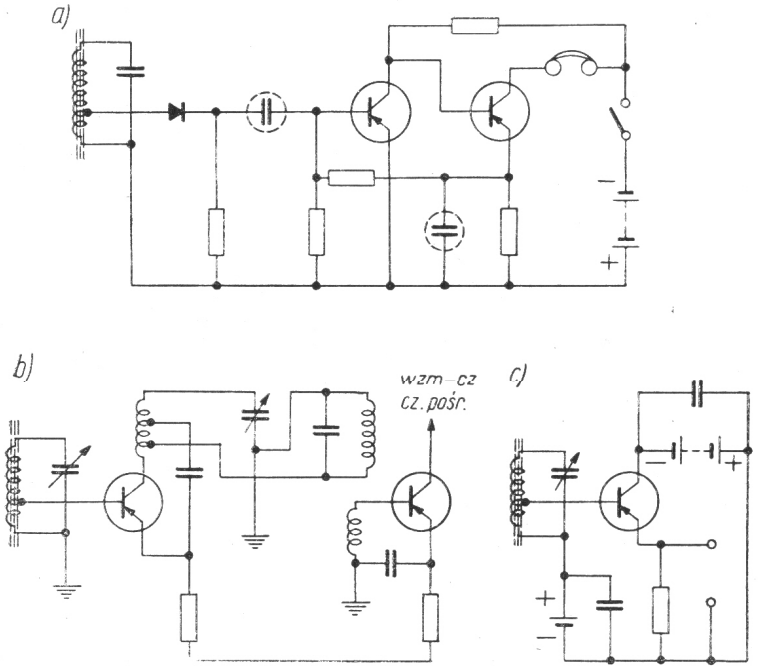
Rys. 17. Metody przyłączenia anten ferrytowych do stopnia lampowego: a) sprzężenie autotransformatorowe, b) sprzężenie indukcyjne; c) sprzężenie pojemnościowe d) pełne włączenie

względem nieruchomej cewki antenowej), osiągnięcie najlepszego wyniku. Takie sprzężenie jest również dogodne wtedy, gdy w pierwszej lampie następuje przemiana częstotliwości. Cewkę sprzęgającą umieszcza się na rdzeniu anteny ferrytowej.

Sprzężenie pojemnościowe stosowane jest zazwyczaj w urządzeniach, w których odbiór nie wymaga zestrajania obwodu antenowego. Pełne przyłączenie anteny ferrytowej jest powszechnie stosowane przy zakresie fal średnich i długich.

Zagadnienie wyboru odpowiedniego rodzaju sprzężenia między anteną a wejściem odbiornika nabiera szczególnej wagi w urządzeniach z półprzewodnikami, dla których charakterystyczna jest bardzo mała — w porównaniu z lampami elektronowymi — oporność wejściowa (rzędu kilkuset omów) oraz duża wartość pojemności wejściowej. Powoduje to konieczność stosowania słabego sprzężenia anteny z obwodem wejściowym. Na rys. 18a podano układ odbiornika detektorowego. W układzie odbiornika superheterodynowego o niepełnym przyłączeniu anteny (rys. 18b) zaleca się włączać w obwód baza-emiter tylko 9 zwojów spośród 60. W tym przypadku oporność włączonej części obwodu wejściowego zmniejszy się w porównaniu z pełnym sprzężeniu anteny $\left(\frac{60}{9}\right)^2$ —

tj. 40-krotnie, napięcie zaś podawane z obwodu wejściowego zmniejszy się zaledwie 6,66 raza. Jednakże dobroć obwodu wejściowego nawet przy słabym sprzężeniu maleje. Dlatego też, aby zwiększyć czułość takiego odbiornika, celowe jest niekiedy zastosowanie jako pierwszego stopnia — wtórnika emiterowego lub układu ze wspólnym kolektorem (rys. 18c). Zastosowanie wtórnika emiterowego umożliwia utrzymanie dużej selektywności obwodu wejściowego i pełne wykorzystanie cennych zalet anteny ferry-

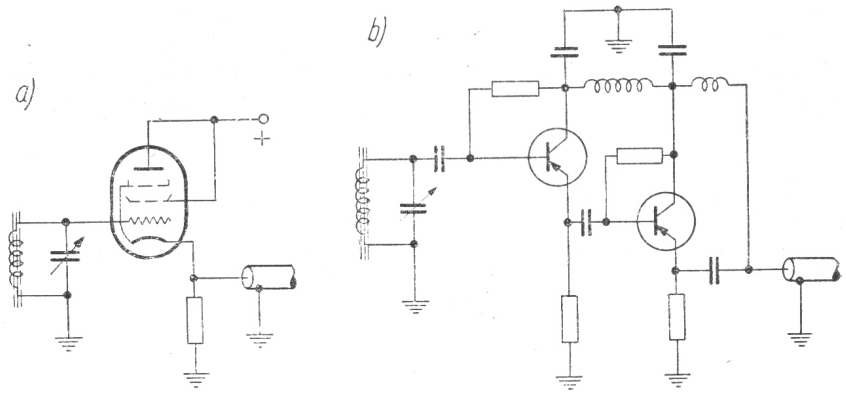


Rys. 18. Metody przyłączania anten ferrytowych w odbiornikach z półprzewodnikami: a) w odbiorniku detektorowym; b) w odbiorniku superheterodynowym; c) z wtórnikiem emiterowym

towej, ponieważ oporność wejściowa tego typu stopnia jest równa βR_0 (wielkość β sięga w przypadku współczesnych tranzystorów 50, a nawet 84), przy czym R_0 oznacza oporność obciążenia wtórnika.

Zdarza się, że antenę ferrytową trzeba „wynieść" poza odbiornik, łącząc ją z odbiornikiem za pomocą linii zasilającej (fideru). W tych przypadkach konieczne jest zastosowanie wtórnika emiterowego (dwustopniowego) albo lampowego wtórnika katodowego. Na rys. 19 podano schematy urządzeń tego typu.

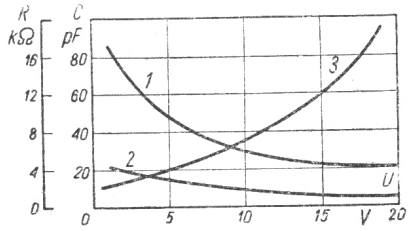
W tranzystorach pojemność złącza *n-p* jest przeważnie uważana za pasożytniczą, ograniczającą zakres częstotliwości urządzenia, gdy tymczasem w szeregu przypadków pojemność ta, lub ściślej



Rys. 19. Przyłączenie anten ferrytowych wyprowadzonych poza odbiornik (z zastosowaniem linii zasilającej): a) układ lampowy; b) dwustopniowy wtórnik emiterowy

mówiąc — zmiana jej pod wpływem napięcia doprowadzonego do urządzenia, może okazać się pożyteczna.

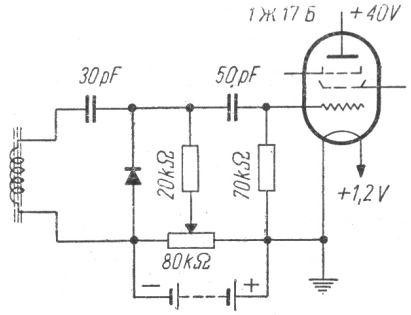
Na rys. 20 uwidoczniono krzywą zależności pojemności złącza *n-p* od napięcia stałego doprowadzonego do diody. Zależność ta



Rys. 20. Zmiana pojemności przejścia kolektora półprzewodników użytych jako element dostrojenia anten ferrytowych
1 — pojemność przejścia kolektora w tranzystorze П6Б; *2* — to samo dla diody ДГ-Ц27; *3* — czynna oporność przejścia w diodzie ДГ-Ц27

umożliwia wykorzystanie półprzewodnika jako elementu strojenia obwodu w odbiornikach o zwartej konstrukcji, w których rozmiary powietrznego kondensatora o zmiennej pojemności rzutują istotnie na wymiary aparatu. Jako element strojenia można wykorzystać diody germanowe typu ДГ-Ц24, ДГ-Ц27 (rys. 21). Ten

sposób strojenia anteny może być realizowany szczególnie w zakresie ultrakrótkofalowym. Jego wadą jest wpływ czynnej



Rys. 21. Wykorzystanie pojemności przejścia n-p ДГ-Ц27 dla dostrojenia anteny ferrytowej

oporności przejścia, bocznikującej obwód wejściowy, a ponadto wąski zakres częstotliwości roboczych.

3. Projektowanie konstrukcji ferrytowej anteny odbiorczej

Wyjściowymi danymi do projektowania anteny są parametry rdzenia (jego przenikalność początkowa, wymiary), dane elektryczne obwodu wejściowego oraz — przy projektowaniu superheterodyny — parametry obwodu heterodyny. Przez określenie „projektowanie anteny" należy rozumieć obliczenie liczby zwojów i wybór konstrukcji cewki antenowej, wyznaczenie miejsca cewki na rdzeniu, ustalenie układu przyłączenia, obliczenie stopnia sprzężenia obwodu antenowego z wejściem odbiornika oraz ostateczne wyznaczanie skutecznej wysokości i skuteczności anteny.

Niekiedy wysuwa się w stosunku do anten dodatkowe wymagania dotyczące zwiększenia selektywności obwodu wejściowego, uzyskania „czystej" charakterystyki kierunkowej, prostoty konstrukcji i strojenia, maksymalnej skuteczności anteny itd.; zmuszają one do wprowadzenia zmian w typowym projektowaniu.

Liczbę zwojów cewki antenowej określa przede wszystkim dopuszczalna wartość indukcyjności obwodu wejściowego.

Znając zakres częstotliwości oraz właściwości konstrukcyjne samego odbiornika (układ sprzężenia obwodu wejściowego z innymi obwodami, pojemność kondensatora strojeniowego i innych elementów wejściowych), można obliczyć cewki ze wzoru

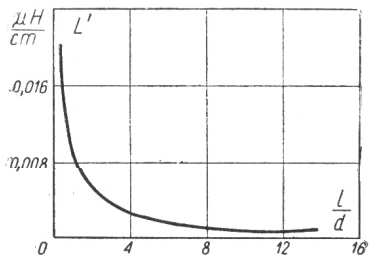
$$L_c = \frac{2{,}53 \cdot 10^4}{f^2_{max} C_{min}},$$

w którym C_{min} jest sumą pojemności kondensatora strojeniowego (minimalną), montażu itd. We wzorze tym indukcyjność wyrażona jest w μH, pojemność w pF, a częstotliwość w MHz.

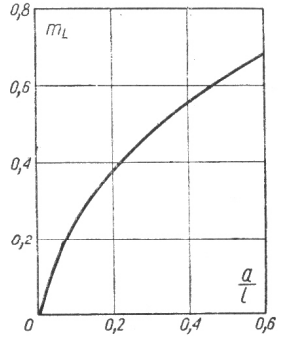
Przed wyznaczeniem liczby zwojów należy obrać odpowiednią konstrukcję cewki. Wybór ten zależy od zakresu częstotliwości i przeznaczenia anteny. Najprostsza jest cewka jednosekcyjna nawijana na styk. Liczbę jej zwojów łatwo obliczyć według metody proponowanej przez B. I. Riazanowa [1]).
Zgodnie z tą metodą obliczenia

$$w = \sqrt{\frac{L_c}{L' D_c \mu_c}}$$

Współczynnik L' jest współczynnikiem kształtu cewki (analogicznie do uprzednio użytego współczynnika Φ), zależnym od stosunku długości cewki do jej średnicy (rys. 22). Najbardziej skom-



Rys. 22. Zmiana współczynnika kształtu cewek L' przy różnych stosunkach ich wymiarów



Rys. 23. Zależność współczynnika m_L od stosunku długości cewki do długości rdzenia $\frac{a}{l}$

plikowane będzie tu określenie współczynnika μ_c. Wyraża się go jako iloczyn czterech współczynników empirycznych

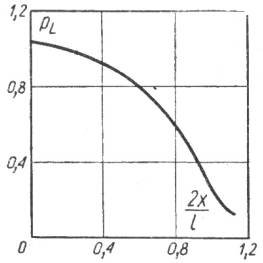
$$\mu_c = \mu_e \, m_L \, p_L \, q_L$$

Współczynnik m_L określa się stosunkiem długości cewki do długości rdzenia (rys. 23); p_L zależy od położenia cewki na rdzeniu (rys. 24); współczynnik q_L wyraża się stosunkiem kwadratu średnicy rdzenia do kwadratu średnicy cewki; μ_e jest przenikalnością skuteczną rdzenia. Jak wynika z powyższego, dla wyznaczenia współczynników m_L, p_L i L' należy mieć żądaną długość cewki, której określenie jest właśnie końcowym celem obliczeń. Jednak z tą pozorną sprzecznością można łatwo dać sobie radę przy pewnym doświadczeniu w dokonywaniu owych obliczeń. Dla ułatwienia zebrano w tablicy 3 typowe dane dotyczące anten ferrytowych

[1]) „Elektroswiaź" 1958, nr 2.

dla zakresu fal średnich i długich w odbiornikach z wejściem lampowym.

Jeśli cewka nie jest nawinięta na styk, co umożliwia pewne zwiększenie skutecznej wysokości anteny, to obliczenie liczby zwojów komplikuje się ze względu na konieczność uwzględnienia niepełnego sprzężenia między zwojami. Jako przykład podobnego obli-



Rys. 24. Zależność współczynnika p_L od umiejscowienia cewki na rdzeniu

czenia może służyć określenie optymalnego odstępu między dwiema sekcjami cewki anteny długofalowej o następujących danych: $\mu_0 = 900$, $l = 480$ mm, $d = 20$ mm. Doświadczalnie stwierdzono, że współczynnik sprzężenia K między dwiema sekcjami zależy od odstępu x między nimi, jak to pokazano na rys. 25, i że współczynnik ten zmienia się według zależności wykładniczej: $K = e^{0{,}158\,x}$.

Przyjmijmy, że L_0 będzie indukcyjnością poszczególnego zwoju, h_0 — skuteczną wysokością pojedynczego zwoju, K — współczynnikiem sprzężenia między dwoma symetrycznie umieszczonymi uzwojeniami, w — liczbą zwojów w sekcji. Wówczas skuteczna wysokość anteny

$$h = h_{01} + h_{02} + \ldots\ldots = 2 \sum_{1}^{n} h_0$$

a. indukcyjność cewki antenowej

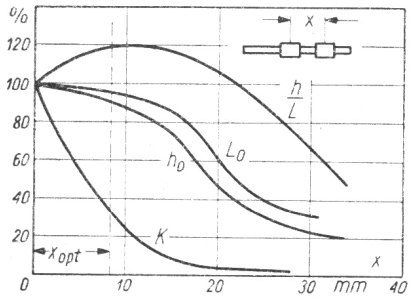
$$L = 2\, w^2 L_0 \,(1 + K_{śr})$$

Tablica 3

Typowe dane dotyczące cewek w antenach ferrytowych dla zakresu średnio- i długofalowego

Średnica rdzenia d (mm)	Liczba zwojów w		Indukcyjność (mH)	
	Fale		Fale	
	średnie	długie	średnie	długie
8	60 ÷ 80	100 ÷ 150	0,2 ÷ 0,3	1 ÷ 1,5
10	35 ÷ 50	80 ÷ 120	0,2 ÷ 0,3	1 ÷ 1,5
15	20 ÷ 25	60 ÷ 80	0,2 ÷ 0,3	1 ÷ 1,5

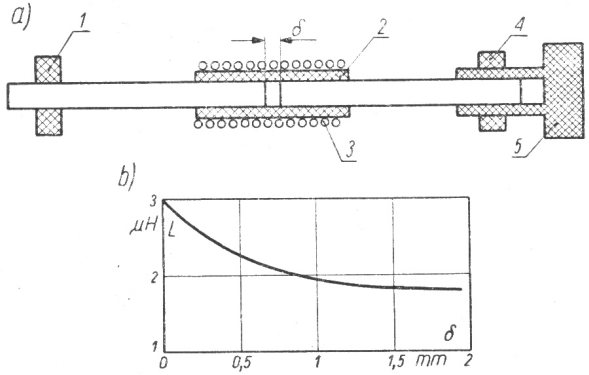
Stosunek $\frac{h}{L}$ wykaże jak trafnie została obrana wielkość sprzężenia między sekcjami. Jak widać z wykresu przedstawionego na rys. 25 optymalny dla danego przypadku będzie odstęp $x = 8$ mm; pod względem wysokości skutecznej osiąga się przy tym odstępie 20% zysku.



Rys. 25. Wykresy do obliczeń najbardziej korzystnego rozmieszczenia sekcji (zależność parametrów anten od odstępu x między sekcjami)

Przy cewce o zwojach rozsuniętych, a w szczególności przy uzwojeniu o skoku narastającym, wartość stosunku $\frac{h}{l}$ w porównaniu z cewką sekcjonowaną zwiększa się o $5 \div 8\%$.

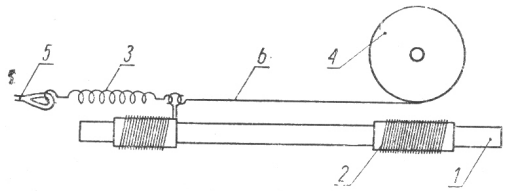
Przy konstrukcyjnym projektowaniu anteny ferrytowej należy uwzględnić możliwość regulowania indukcyjności cewki antenowej po jej zainstalowaniu w odbiorniku.



Rys. 26. Antena z regulowaną szczeliną powietrzną: a) konstrukcja anteny, (*1, 4* — uchwyty; *2* — korpus; *3* — cewka; *5* — kołnierz z gwintem posuwowym); b) krzywa zmiany indukcyjności przy zmianie szczeliny δ

Zwykła regulacja polega na przemieszczeniu cewki antenowej wzdłuż rdzenia, o czym była już mowa w rozdziale pierwszym (punkt 3). Tego rodzaju regulacja umożliwia zmianę indukcyjności

o 20%. Drugi sposób regulowania indukcyjności anteny lub przestrojenia jej w pewnym zakresie częstotliwości polega na wprowadzeniu regulowanej szczeliny między dwiema połówkami rdzenia (rys. 26a). Na rys. 26b pokazano zależność indukcyjności cewki antenowej od wielkości szczeliny δ między połówkami rdzenia wykonanego z ferrytu F-20. Stosując ferryty o większej przenikalności magnetycznej można uzyskać pokrycie większego zakresu częstotliwości. Stosowany jest jeszcze jeden sposób regulowania indukcyjności anteny, polegający na zmianie odstępu między sekcjami cewki antenowej (rys. 27). Taki sposób regulowania induk-



Rys. 27. Urządzenie do dostrojenia anteny przez zmianę odstępu między sekcjami
1 — rdzeń; *2* — sekcja cewki; *3* — sprężyna; *4* — tarcza napędowa; *5* — punkt umocowania; *6* — linka

cyjności — dzięki bardzo szerokim granicom jej zmiany może być sposobem podstawowym, gdyż pozwala obejść się bez zmiennego kondensatora.

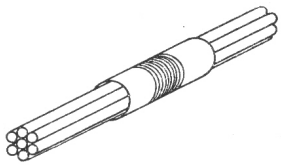
Antenę ferrytową należy umieścić jak najbliżej stopnia wejściowego, aby zmniejszyć długość przewodów montażowych, a zatem i pojemność pasożytniczą. W pobliżu anteny nie powinny się znajdować zwoje zamknięte, które osłabiają pole. Wsporniki anteny należy zaopatrzyć w miękkie podkładki, aby wyeliminować zbyteczne naprężenia mechaniczne. Dla uniknięcia zwiększenia się pojemności własnej antena powinna być oddalona od podstawy odbiornika na odległość co najmniej 3 cm. Ponadto antena ferrytowa powinna być umieszczona jak najdalej od transformatora zarówno od sieciowego, jak i wyjściowego oraz od głośnika elektrodynamicznego.

4. Metody zwiększania skuteczności ferrytowych anten odbiorczych

Porównawcze obliczenie ferrytowej anteny odbiorczej dowodzi, że pod względem skuteczności dorównuje ona zazwyczaj jedno- lub dwumetrowemu prętowi. W wielu przypadkach skuteczność taka jest jednak niedostateczna.

Najprostszym sposobem zwiększenia skuteczności jest powiększenie geometrycznych wymiarów rdzenia. Zysk polega tu na tym,

że indukcyjność cewki antenowej wzrasta w miarę zwiększania średnicy rdzenia proporcjonalnie do pierwszego stopnia tego zwiększenia, podczas gdy skuteczna wysokość wzrasta proporcjonalnie do kwadratu średnicy. Mankamentem tej metody jest zwiększenie wymiarów i ciężaru rdzenia; wzrostowi bowiem średnicy powinien towarzyszyć wzrost długości, aby przenikalność skuteczna rdzenia pozostała bez zmiany. Innymi słowy, zwiększenie średnicy pociąga za sobą gwałtowny wzrost wymiarów, a więc i ciężaru rdzenia (ciężar właściwy ferrytu wynosi ok. 5 G/cm^3).



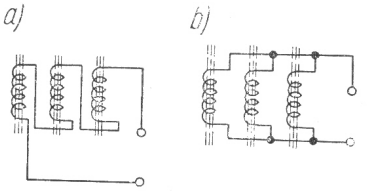
Rys. 28. Antena ferrytowa z rdzeniem w postaci wiązki prętów

Niekiedy napotyka się trudności w wyborze rdzenia o odpowiedniej średnicy. Wyjściem z tych trudności może być zastosowanie wiązki prętów cylindrycznych. Użyteczna powierzchnia przekroju takiego rdzenia, określająca wysokość skuteczną, zwiększa się $Z^{0,42}$ razy (Z oznacza liczbę prętów w wiązce), zaś indukcyjność — $Z^{0,38}$ razy, jeśli stosunek $\frac{l}{d}$ jest dostatecznie duży. Na rys. 28 pokazano konstrukcję rdzenia anteny utworzonego z wiązki prętów cylindrycznych.

Inny sposób zwiększenia skutecznej wysokości ferrytowej anteny odbiorczej polega na szeregowym lub równoległym połączeniu kilku anten ferrytowych. Koncepcja szeregowego połączenia kilku anten jest pokrewna koncepcji sekcjonowania cewki antenowej. Istotnie, dzieląc cewkę antenową na dwie części oraz umieszczając je na dwóch prętach i łącząc szeregowo, zmniejszamy indukcyjność anteny prawie dwukrotnie, gdyż sprzężenie między antenami przy ich wzajemnym oddaleniu już o $2 \div 3$ cm jest znikomo małe. Umożliwia to zwiększenie ogólnej liczby zwojów w obu cewkach o 1,41 raza (czyli o $\sqrt{2}$) przy nawijaniu na styk. Przy rozczłonkowaniu cewki antenowej na 3 prętach można zwiększyć ilość zwojów o 1,73 raza (czyli o $\sqrt{3}$), na 4 prętach — 2 razy itd. Należy jednak zaznaczyć, że zwiększeniu liczby prętów towarzyszy zwiększenie sprzężenia między nimi, wobec czego indukcyjność cewki antenowej nawiniętej na n prętach zmniejszy się mniej niż n-krotnie, gdyż indukcyjność każdej z części będzie równa

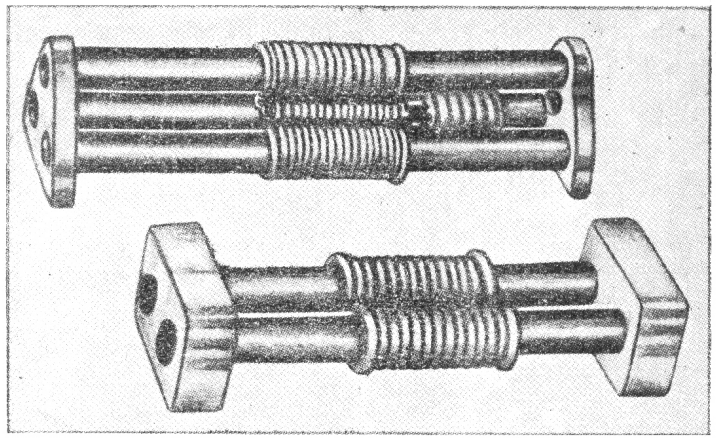
$$\frac{L_{ogól}}{n}(1 + K_1 + K_2 + K_3 + \ldots\ldots + K_{n-1})$$

Przy szeregowym połączeniu poszczególnych anten pręty powinny być ustawione równolegle, poszczególne zaś cewki anteny włączone w zgodnym kierunku — rys. 29 (ważne jest tu jednakowe nawijanie cewek i odpowiednie połączenie końcówek uzwojeń). Przy równoległym połączeniu poszczególnych cewek antenowych uzyskuje się tak samo dodatnie wyniki. Przy braku albo przy małej wartości sprzężenia między równolegle połączonymi cewkami indukcyjność takiej anteny zmniejsza się dwukrotnie; można



Rys. 29. Przyłączenie pojedynczych anten: a) szeregowe, b) równoległe

to również skompensować zwiększeniem liczby zwojów o 1,41 raza. Analogicznie do połączenia szeregowego przy dużej liczbie prętów istnieje możliwość zwiększenia liczby zwojów, a więc zwiększenia skuteczności anteny. Przeszkodą w powiększaniu liczby prętów, poza wyżej wskazanymi czynnikami, jest szybki wzrost pojemności własnej anteny ferrytowej. Na rys. 30 przedstawiono widok anteny ferrytowej o równoległym połączeniu cewek antenowych dla zakresu fal ultrakrótkich.



Rys. 30. Wygląd zewnętrzny anten ferrytowych dla zakresu UKF

Znane są inne jeszcze sposoby zwiększenia skuteczności anten. Można je objaśnić w sposób uproszczony w oparciu o zjawiska magnetostatyczne (zdolność materiałów ferromagnetycznych do „przyciągania", „zbierania" i „kierowania" magnetycznych linii

sił). Możliwość kierowania strumieniami magnetycznymi za pomocą zarówno strumienia zewnętrznego, wytworzonego przez pole elektromagnetyczne, jak i strumienia wewnętrznego, wytworzonego przez cewkę antenową, jest charakterystyczną i wiele obiecującą cechą anten ferrytowych.

Z tymi właściwościami anten ferrytowych już się spotkaliśmy. Oto na przykład skomplikowany, łamany kształt rdzenia antenowego typu Z nie zmienia właściwości anteny. Podobne prawidłowości dają się zaobserwować również w ferrytowych antenach półkompasów na samolotach. Antena taka jest umieszczona we wgłębieniach korpusu (zazwyczaj metalowego), co jednak nie zmniejsza jej właściwości odbiorczych.

Przy analizie metod zwiększania skuteczności anten ferrytowych należy się oprzeć na wspomnianym wyżej twierdzeniu, że skuteczność anteny ferrytowej jest wprost proporcjonalna do wzajemnego wpływu (wzajemnego sprzężenia) dwóch strumieni magnetycznych — strumienia wytwarzanego przez pole zewnętrzne oraz strumienia wytwarzanego przez cewkę antenową. Na słuszność tego twierdzenia wskazują rozpatrzone wyżej metody zwiększania skuteczności. Na przykład przy zwiększeniu średnicy pręta strumień magnetyczny pola zewnętrznego zwiększa się proporcjonalnie do kwadratu średnicy, podczas gdy strumień cewki antenowej zwiększa się w stopniu mniejszym (zmniejsza się liczba zwojów przy stałej indukcyjności). I na odwrót, przy równoległym połączeniu anten ferrytowych możliwe jest zwiększenie liczby zwojów na pręcie, a więc zwiększenie strumienia magnetycznego cewki antenowej przy niezmiennym strumieniu pola zewnętrznego. W wyniku, mimo odmiennych w swej istocie metod następuje polepszenie odbioru.

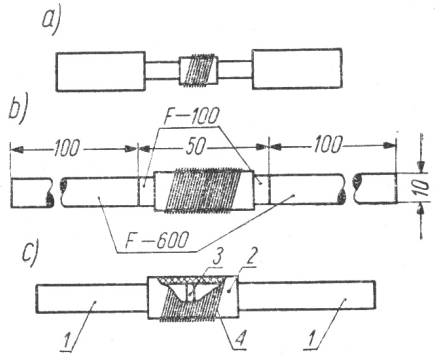
Przy konstruowaniu anteny ferrytowej należy mieć na uwadze aby przez zwiększenie strumienia magnetycznego pola zewnętrznego w rdzeniu oraz zmniejszenie strumienia cewki antenowej można było osiągnąć polepszenie odbioru.

Strumień magnetyczny powstający w rdzeniu pod wpływem pola zewnętrznego można zwiększyć stosując odpowiedni kształt rdzenia lub dobierając rdzeń wykonany z odpowiedniego materiału.

Jako przykład rozpatrzmy antenę ferrytową z rdzeniem o niejednakowej średnicy przekroju w postaci uwidocznionej na rys. 31. Pomiary dokonane w ferrytach o małej przenikalności magnetycznej wykazały, że jeśli zwiększymy dwukrotnie średnicę obu końców rdzenia, pozostawiając średnicę środkowej części (równej $\frac{1}{3}$ długości rdzenia) bez zmiany, to wysokość skuteczna wzrośnie 2,5 ÷ 3-krotnie, natomiast indukcyjność cewki antenowej zaledwie o 20 ÷ 30%. Powyższy stosunek wymiarów rdzenia o profilu kształ-

towanym, podany tylko jako przykład, prawdopodobnie nie w pełni określa maksymalny zysk, jaki można osiągnąć za pomocą tej właśnie metody.

Inny sposób zwiększenia strumienia magnetycznego polega na zastosowaniu rdzenia składającego się z członów o różnych właściwościach magnetycznych (rys. 31b). W szczególności dla skoncentrowania magnetycznego strumienia pola zewnętrznego więk-



Rys. 31. Anteny ferrytowe o zmiennym przekroju i zmiennej przenikalności: a) antena z rdzeniem o kształtowanym profilu; b) antena dla fal krótkich z rdzeniem członowym; c) antena dla zakresu UKF z przekładką: *1* — rdzeń; *2* — korpus; *3* — przekładka polistyrenowa; *4* — cewka

szą część rdzenia wykonuje się z materiału o większej przenikalności magnetycznej, natomiast część rdzenia, na której jest osadzona cewka antenowa, i której materiał określa dobroć anteny, może być wykonana z ferrytu o mniejszej przenikalności, lecz również i o mniejszych stratach.

Pewną modyfikacją tej metody jest utworzenie w rdzeniu szczeliny niemagnetycznej. Rdzeń anteny składa się wówczas z dwóch połówek połączonych przekładką z polistyrenu, przyklejoną do rdzenia żywicą epoksydową (rys. 31c).

Wprowadzenie tej przekładki zwiększa półtorakrotnie dobroć cewki antenowej przy wzroście liczby zwojów o 20%. Grubość przekładki powinna być rzędu 1 ÷ 1,5 mm.

Są możliwe oczywiście i kombinacje obu metod: rdzenie o profilu kształtowanym mogą być zestawiane z różnych części wykonanych z materiałów o odmiennych właściwościach magnetycznych. Przed zestawieniem w całość powierzchnie tych części trzeba dokładnie oszlifować. Należy pamiętać, że nieszczelne przyleganie powierzchni ferrytu zmniejsza jego przenikalność magnetyczną. Wielkość tego zmniejszenia można obliczyć ze wzoru

$$\mu_{szcz} = \frac{\mu_e}{r(\mu_e - 1) + 1}$$

w którym:

μ_{szcz} — przenikalność skuteczna rdzenia ze szczeliną,

r — stosunek długości szczeliny do ogólnej długości rdzenia.

Rozdział 3

METODY POMIARU CHARAKTERYSTYK ANTEN FERRYTOWYCH

1. Zasady i metody pomiaru

Przy konstruowaniu anteny ferrytowej konieczne jest często sprawdzenie jej parametrów: indukcyjności cewki antenowej, dobroci i wysokości skutecznej.

Konieczność ta wynika nie tylko ze względu na niedoskonałość metod projektowania, lecz również z powodu niestałości charakterystyk ferrytu, uwarunkowanej złożonością procesu technologicznego, naturalnym starzeniem się itd. Wystarczy tu stwierdzenie, że rozrzut charakterystyk (w sensie przenikalności magnetycznej) rdzeni ferrytowych o tym samym znaku fabrycznym i z tą samą datą wyprodukowania dochodzi do 20%.

Szczególnie konieczne są pomiary przy pracach eksperymentalnych, mających na celu zwiększenie skuteczności anteny, zwłaszcza gdy wyniki doświadczeń wskazują na przydatność tej czy innej inowacji w konstrukcji anteny.

Najczęściej używanym tu przyrządem pomiarowym jest miernik dobroci — Q-metr. Przemysł radziecki produkuje Q-metry zarówno krótkofalowe (typu KB-1), jak i ultrakrótkofalowe (typu УК-1). Oba te przyrządy umożliwiają określenie indukcyjności i dobroci cewki antenowej oraz dodatkowe pomiary, w szczególności określenie pojemności cewki antenowej lub wyznaczenie częstotliwości własnej obwodu antenowego. Pojemność własną anteny ferrytowej wyznacza się w ten sam sposób co i pojemność zwykłych cewek. Dla określenia częstotliwości własnej obwodu antenowego (co jest niezbędne np. w przypadku konstruowania telewizyjnej anteny ferrytowej) należy do końcówek oznaczonych „indukcyjność" ultrakrótkofalowego Q-metru typu УК-1 podłączyć niewielki zwój o średnicy $4 \div 5$ cm, po czym za pomocą kondensatora dostroić Q-metr do zbliżonej częstotliwości. Następnie należy zbliżyć do zwoju mierzoną antenę ferrytową (ściślej mówiąc: obwód antenowy) na odległość $3 \div 4$ cm. Jeśli przy tym częstotliwość dostrojenia Q-metru zmienia się, oznacza to, że częstotliwość

własna obwodu antenowego nie jest zgodna z częstotliwością Q-metru. Przy zgodności częstotliwości dostrojenie obwodu Q-metru pozostaje niezmienione (zmniejsza się tylko nieznacznie Q).

Za pomocą Q-metru można również orientacyjnie określić typ nieznanego pręta ferrytowego. W tym celu określamy jego granicę częstotliwościową, to znaczy tę częstotliwość dostrojenia, poza którą następuje pogorszenie Q do wielkości równej ok. 10. Korzystając z tablicy 1, można na podstawie tej częstotliwości ustalić typ nieznanego ferrytu. Przy tego rodzaju pomiarach należy pamiętać, że dobroć cewki antenowej zależy od liczby zwojów; zatem liczba zwojów cewki antenowej powinna odpowiadać danemu zakresowi częstotliwości (tabl. 3). Bardziej dokładnie można określić przenikalność magnetyczną badanego pręta, jeśli się skorzysta z metody opisanej w poprzednim rozdziale, a polegającej na tym, że po określeniu indukcyjności oblicza się na podstawie znanej liczby zwojów oraz znanych wymiarów cewki najpierw μ_c, a następnie μ_0.

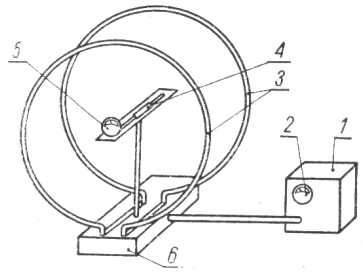
Za pomocą Q-metru można również określić wielkość sprzężenia między równoległymi lub szeregowymi antenami; w tym celu korzysta się z metody stosowanej przy określaniu indukcyjności wzajemnej między zwykłymi cewkami.

Przy konstruowaniu anten ferrytowych, zwłaszcza dla zakresu ultrakrótkofalowego należy nieraz sprawdzić, jak daleko odbiegła częstotliwość robocza wykonanej anteny od częstotliwości rezonansu własnego. Za pomocą Q-metru można łatwo to określić wyznaczając indukcyjność na kilku częstotliwościach. Jeśli indukcyjność badanej anteny zaczyna szybko zwiększać się w miarę wzrostu częstotliwości oznacza to, że częstotliwość anteny zbliża się do częstotliwości rezonansowej i że wobec tego liczbę zwojów należy zmniejszyć. Pomiar indukcyjności cewki antenowej może być wykonywany również przy użyciu zwykłych przyrządów mostkowych. Należy przy tym mieć jednak na względzie, że większość mierników indukcyjności pracuje przy stosunkowo małych częstotliwościach, w związku z czym trudno na podstawie ich wskazań ocenić straty w badanej antenie.

2. Pomiary w polu zwykłym

Opisane metody pomiarów nie dają bezpośredniej odpowiedzi na pytanie, jaki jest stopień skuteczności skonstruowanej anteny. Odpowiedź taką można otrzymać pod warunkiem, że znane są zarówno natężenie pola w miejscu odbioru, jak i napięcie na wyjściu anteny lub na wyjściu odbiornika o znanym wzmocnieniu. Znajomość tych wielkości umożliwia mniej lub bardziej dokładne określenie skutecznej wysokości anteny na drodze obliczeń.

Jednakże pomiar natężenia pola wymaga użycia dość złożonej aparatury, a poza tym nie zawsze jest możliwy z powodu zakłóceń. Można jednak stworzyć w sztuczny sposób warunki dla szybkiego i bezpośredniego pomiaru skutecznej wysokości anteny ferrytowej. Taką możliwość zapewnia makieta pola standartowego (pola Helmholtza), która przy użyciu prostych przyrządów pomiarowych (na przykład miliamperomierza cieplnego) umożliwia pomiar poziomu natężenia pola. Uzyskiwane w makiecie pole jest jednorodne, a poza tym natężenie jego może być wystarczające dla pomiaru skutecznej wysokości anteny za pomocą zwykłego mikroamperomierza.



Rys. 32. Widok ogólny makiety pola standartowego do pomiarów anten ferrytowych: 1 — generator; 2 — miliamperomierz; 3 — zwoje; 4 — antena ferrytowa; 5 — indykator; 6 — stojak

Ogólny widok makiety pola standartowego przedstawiony jest na rys. 32. Źródłem pola jest antena ramowa utworzona z dwóch równoległych do siebie zwojów podłączonych do generatora wielkiej częstotliwości o symetrycznym wyjściu.

Natężenie pola elektrycznego związane jest z prądem w zwojach według zależności

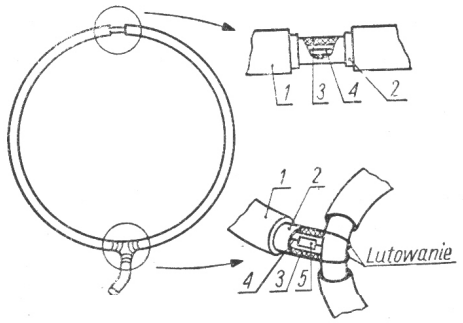
$$E = 86\pi \frac{1}{R} I$$

w której: I — prąd sumaryczny zasilający oba zwoje [A],
R — promień zwoju [m].

We wzorze tym natężenie pola elektrycznego wyrażone jest w V/m. Przy promieniu zwojów równym 27,5 cm oraz prądzie równym 1,02 mA — natężenie pola wynosi 1 V/m. Między zwojami należy stosować odstęp $25 \div 30$ cm w celu wytworzenia najbardziej jednorodnego pola. Zwoje mogą być wykonane z rurki mosiężnej.

Bardziej dogodny pod względem konstrukcyjnym jest układ przyrządu z aperiodyczną ramką ekranowaną jako źródłem pola. Ekranowanie ramki umożliwia zasilanie jej przez niesymetryczny generator bez obawy, że obecność operatora i znajdujących się w pobliżu przedmiotów wpłynie na wyniki pomiarów. Zastosowanie ramki aperiodycznej umożliwia kontrolę obciążenia generatora i jest wygodne przy dokonywaniu pomiarów, gdyż w tym przypadku prąd zasilający ramkę wzrasta. Ekranowaną ramkę aperiodyczną łatwo można wykonać z kabla radiowego (rys. 33).

Do tego celu potrzebny jest odcinek kabla typu PK-1 [1]) o długości nieco większej niż długość l obwodu ramki ($l = 2\pi R$); z jednego końca tego odcinka na długości $3 \div 4$ cm zdejmuje się powłokę ochronną, rozwija się oplot wykonany z drutów miedzianych i wiąże się je w dwie wiązki, a przewód (żyłę) wewnętrzny oczyszcza się z izolacji i ocynowuje się. Następnie w odległości równej długości obwodu ramki zdejmuje się z kabla powłokę ochronną i opłot z drutów miedzianych i tak jak poprzednio — po oczyszczeniu z izolacji — ocynowuje się przewód wewnętrzny.



Rys. 33. Ramka ekranowana z kabla radiowego dla makiety pola standartowego; 1 — powłoka ochronna; 2 — oplot pancerny; 3 — izolacja; 4 — żyła kabla; 5 — opornik

Po wykonaniu tych czynności do oczyszczonego końca przewodu (żyły) wewnętrznego przylutowuje się opornik (75 Ω) o małych wymiarach, którego drugi koniec przylutowuje się do oczyszczonego z izolacji i ocynowanego miejsca kabla. W tym samym miejscu przylutowuje się dwie wiązki miedzianego oplotu końca kabla, którymi obejmuje się opornik i oplot obnażonego miejsca połączenia. Wykonane w ten sposób połączenie owija się taśmą izolacyjną. Następnie na długości 1 cm części środkowej odcinka kabla tworzącego ramkę zdejmuje się powłokę ochronną i oplot.

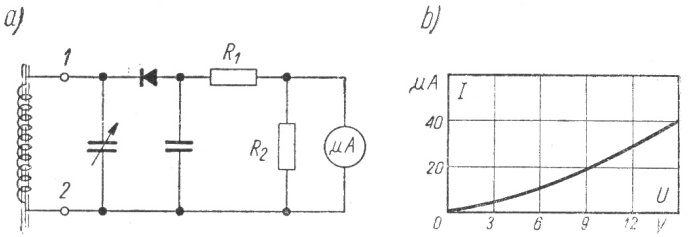
Obie tak wykonane ramki łączy się równolegle i umieszcza w odległości równej promieniowi ramki. Dla usztywnienia konstrukcji zwoje ramki ekranowanej umocowuje się na sztywnych podstawach (z getinaksu lub forniru). Promień ramek dobiera się w zależności od zakresu roboczego. W zakresie fal średnich i długich wygodnie jest obrać promień równy 27,5 cm, w zakresie zaś ultrakrótkofalowym — nie większy od 20 cm.

---

[1]) Oznaczenie znormalizowane ZSRR.

Moc nadajnika, konieczna do wytworzenia pola o natężeniu rzędu 1 W/m, może nie przewyższać 0,1 ÷ 0,2 W. Generator wielkiej częstotliwości można wykonać jako dwustopniowy nadajnik małej mocy.

Skuteczność anteny ferrytowej mierzy się przy silnym polu prostym indykatorem, składającym się ze zwykłego detektora krystalicznego i mikroamperomierza prądu stałego. Na rys. 34 przedstawiono schemat takiego indykatora. Antenę ferrytową umieszczoną w standartowym polu można dostroić za pomocą kondensatora strojeniowego. Wielkość obciążenia detektora (wartość opornika R_1) dobiera się tak, aby była ona równa lub nieco przekra-



Rys. 34. Indykator do określenia wysokości skutecznej anteny ferrytowej: a) schemat; b) typowa charakterystyka indykatora

czała wartość oporności wejściowej lampy lub innego elementu wejściowego. Oporność R_1 jest przy tym znacznie większa od oporności R_2, a z kolei oporność R_2 jest mniejsza od oporności mikroamperomierza.

Ze względu na wygodę obsługi mikroamperomierz umieszczony jest na jednej z podstaw, na których umocowuje się zwoje (ramki).

3. Metody pomiaru wysokości skutecznej i skuteczności anteny

Przed przystąpieniem do bezpośrednich pomiarów należy się przekonać na drodze pomiaru prądu zasilającego ramkę i obliczenia natężenia pola, czy wartość tego natężenia jest dostateczna dla dokonania pomiarów. Jeśli się dokonuje bezpośredniego pomiaru wysokości skutecznej (bez dostrojenia anteny), to natężenie pola nie powinno być mniejsze od 20 V/m. Przy tego rodzaju pomiarach obciążeniem detektora jest bezpośrednio oporność mikroamperomierza typu M-494 lub M-24. Dla ułatwienia pracy zaleca się wykreślić przed pomiarem charakterystykę detektorową indykatora. W tym celu przyłącza się do wyjścia anteny (zaciski *1* i *2*, rys. 34) dostatecznie czuły woltomierz lampowy typu ВлУ lub ВКС-7 i określa zależność prądu mikroamperomierza od napięcia

wytwarzanego przez antenę. Następnie można już przystąpić do bezpośrednich pomiarów wysokości skutecznej. Antenę umieszcza się w środku między ramkami na podstawce z materiału izolacyjnego (szkło organiczne, getinaks) w taki sposób, aby oś rdzenia pokrywała się z osią przechodzącą przez środki ramek.

W celu dostrojenia anteny ferrytowej do różnych częstotliwości stosuje się kondensator powietrzny (jego rotor musi się lekko obracać), którego pojemność powinna się zmieniać w tych samych granicach, w jakich się zmienia pojemność kondensatora wykorzystanego w odbiorniku. W tym przypadku obiera się oporność obciążenia rzędu 100 ÷ 150 kΩ, mikroamperomierz zaś podłącza się do części obciążenia, której oporność jest 3 ÷ 4-krotnie mniejsza od oporności mikroamperomierza.

Na rys. 34b przedstawiono typową charakterystykę indykatora do pomiarów w zakresie ultrakrótkofalowym. Dioda jest tutaj typu Д-2Г, oporność obciążenia $R_1 = 130$ kΩ, oporność $R_2 = 200$ Ω, a pojemność kondensatora blokującego wynosi 68 pF. Charakterystykę detektora wyznacza się przy dostrojonym obwodzie antenowym.

A oto kilka rad, które mogą się okazać pożyteczne przy dokonywaniu pomiarów. Przy dostrajanej antenie jest rzeczą bardzo ważną dokładne dostrojenie do rezonansu. W tym celu należy stroić z grubsza kondensatorem, dokładnie zaś — przez zmianę częstotliwości generatora, starając się osiągnąć maksymalne wychylenie wskazówki mikroamperomierza.

W przestrzeni między ramkami nie powinno być żadnych metalowych przedmiotów, które mogłyby zniekształcić pole. Przy pomiarach operator powinien się znajdować w odległości nie mniejszej niż pół metra od stanowiska pomiarowego. W jego polu widzenia powinny się znajdować obydwa przyrządy — miliamperomierz mierzący prąd ramki oraz mikroamperomierz indykatora. Należy się starać o to, aby poziom natężenia pola był stały.

Oprócz bezpośrednich pomiarów wysokości skutecznej oraz skuteczności anten ferrytowych można za pomocą tego przyrządu mierzyć również dobroć obwodu antenowego czynnego w zestawie (niekiedy wraz z lampą elektronową lub tranzystorem). W tym celu po dokładnym dostrojeniu określa się pasmo przepuszczania obwodu; oblicza się je jako różnicę między częstotliwościami generatora, przy których napięcie w obwodzie maleje do poziomu równego 0,7 wartości maksymalnej. Wówczas dobroć obwodu oblicza się ze wzoru:

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f}$$

w którym: f_0 — częstotliwość dostrojenia anteny [kHz],
$2\Delta f$ — pasmo przepuszczania obwodu [kHz].

Rozdział 4

ANTENY FERRYTOWE DLA ZAKRESU UKF ORAZ ELEMENTY OBWODÓW ANTENOWYCH Z FERRYTAMI

1. Ferrytowa telewizyjna antena pokojowa

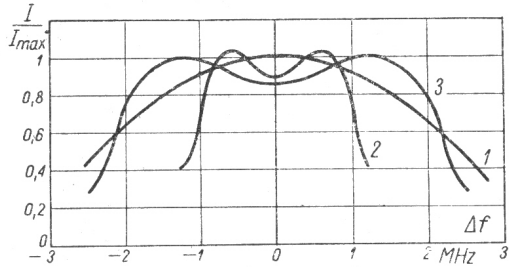
Telewizja stała się nie tylko trwałym zjawiskiem we współczesnym życiu codziennym, lecz znalazła również szerokie zastosowanie w nauce i technice dnia dzisiejszego. Telewizja umożliwia śledzenie różnych procesów i przede wszystkim procesu produkcyjnego, którego bezpośrednie obserwowanie jest bądź utrudnione, bądź niebezpieczne lub niewygodne. Obecnie telewizja znalazła szerokie zastosowanie w produkcji i transporcie kolejowym, w produkcji grożącej wybuchem, w metalurgii, medycynie. W większości urządzeń telewizji przemysłowej sygnał jest przesyłany na niewielkie odległości, wobec czego urządzenie odbiorcze łącznie z anteną powinno zajmować mało miejsca.

Wbudowana antena jest korzystna również w zwykłych telewizorach. Mówiąc o upowszechnianiu pokojowych anten telewizyjnych warto dla analogii sięgnąć do historii rozwoju radiowych anten odbiorczych. We wczesnym okresie rozwoju odbiorników, kiedy czułość ich była mała podobnie jak i moc stacji nadawczych, instalowano anteny radiowe ponad dachami gmachów, zawieszano je na słupach, drzewach itd. Stopniowo zaczęto stosować anteny pokojowe w postaci kawałka przewodu rozciąganego wzdłuż ścian; ostatnio produkuje się już odbiorniki z wbudowanymi antenami ferrytowymi.

Przez analogię można więc stwierdzić, że pokojowe anteny telewizyjne znajdują się na drugim etapie swego rozwoju. Stosowane obecnie pokojowe anteny telewizyjne przedstawiają dipole lub „wąsy" z przewodów (prętów), połączone z odbiornikiem linią zasilającą. Tego rodzaju anteny — ze względu na specyficzne warunki rozprzestrzeniania się fal ultrakrótkich — nie potrafią nawet przy dostatecznym natężeniu pola zapewnić dobrego jakościowo odbioru wewnątrz pomieszczeń. Sprawa polega na tym, że pole w tym przypadku ma charakter interferencyjny, tzn. że w wyniku sumowania się padających i odbitych fal jest nierównomierne pod

względem amplitudy i fazy, a wobec tego niemożliwe jest pełne wykorzystanie skutecznej długości anteny. Poza tym w praktyce rzadko stosuje się symetryczne anteny pokojowe; są one raczej niesymetryczne, a przeto narażone na działanie zakłóceń oraz fal o polaryzacji pionowej. Praktycznie biorąc, antena taka nie przejawia właściwości kierunkowych.

Wykorzystanie anten ferrytowych dopomogło by do usunięcia większości mankamentów zwykłych anten pokojowych. Rzeczywiście, antena ferrytowa, dzięki o wiele mniejszym wymiarom nie szpeci wyglądu pokoju, gdyż może być wbudowana w telewizor; nie ma potrzeby orientowania anteny przy odbiorze fal polaryzowanych poziomo; jest ona w najwyższym stopniu symetryczna itd.

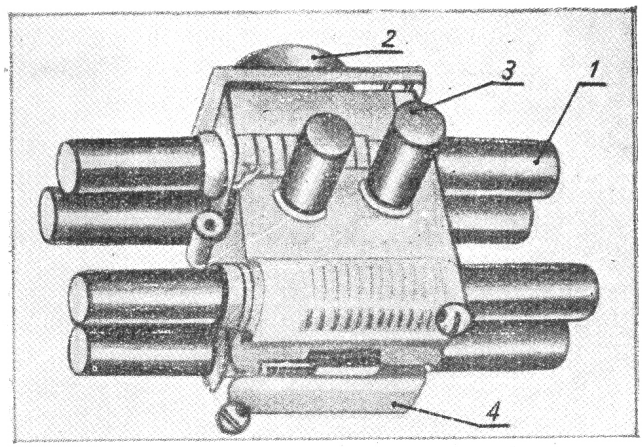


Rys. 35. Charakterystyki amplitudowe: *1* — obwodu pojedynczego *2* — obwodów sprzężonych przy $Q = 50$; *3* — obwodów sprzężonych przy $Q = 25$

Podstawowym jednak zagadnieniem które należy przedtem rozwiązać, jest uzyskanie takiej skuteczności anteny ferrytowej, by dorównywała ona skuteczności dipola poziomego. Przy określaniu skuteczności ferrytowej anteny telewizyjnej należy uwzględnić to, że dla wysokojakościowego odtwarzania obrazów przepuszczane pasmo anteny powinno wynosić $5 \div 6$ MHz. Szerokość przepuszczanego pasma jest odwrotnie proporcjonalna do dobroci obwodu wejściowego; im szersze jest więc pasmo częstotliwości, tym mniejsza będzie dobroć i w ostatecznym wyniku również mniejsza skuteczność anteny.

Można rozszerzyć to pasmo przez zbocznikowanie obwodu wejściowego rzeczywistą opornością $3 \div 4$ kΩ (dla kanału I) lub $5 \div 6$ kΩ (dla kanału III). Dobroć obwodu nie przekracza wówczas $10 \div 12$. Oporność wejściowa lamp wzmacniających wielkie częstotliwości typu 6Н3Д, 6Ж4, stosowanych w nowoczesnych telewizorach, ma wartość porównywalną z wartością bocznikującego opornika, wobec czego antenę można bezpośrednio podłączyć do lampy wejściowej. Ujemną przy tym jednak cechą jest spadzista charakterystyka amplitudowa obwodu wejściowego i mała skuteczność anteny jako całości (rys. 35).

Lepsze wyniki można uzyskać przy zastosowaniu anten sprzężonych. Obliczenia wykazują, że silne sprzężenie dwóch pojedynczych obwodów może zapewnić pasmo przepuszczania o szerokości ok. 4 MHz, jeśli dobroć obwodów wynosi 25. Zastosowanie obwodów sprzężonych daje zysk na napięciu, które wzrasta dwukrotnie w porównaniu z metodą prostego bocznikowania. Poza tym zysk wzrasta jeszcze bardziej ze względu na to, że oba obwody są aktywne, i wobec tego SEM powstała pod wpływem pola zewnętrznego zostaje wzbudzona w każdym z obwodów oddzielnie. Ograniczenie przepuszczanego pasma anteny do szerokości 4 MHz przy stosunkowo stromych zboczach wywiera dodatni wpływ na obraz telewizyjny (odporność na zakłócenia).



Rys. 36. Ferrytowa telewizyjna antena pokojowa do odbioru dwóch programów: *1* — antena dla programu pierwszego; *2* — bęben przełącznika; *3* — antena dla programu drugiego; *4* — uchwyt

Innym zagadnieniem przysparzającym trudności przy konstruowaniu telewizyjnej anteny ferrytowej jest konieczność przestrajania jej z jednego kanału na drugi. Przy niewielkiej liczbie kanałów (dwa lub trzy) przestrojenie anteny może być realizowane przez przełączenie poszczególnych anten wbudowanych w odbiornik. Manipulacja okazuje się bardziej dogodna niż stosowane w odbiornikach radiowych przełączenie części uzwojenia.

Zewnętrzny wygląd dwuprogramowej, ferrytowej, telewizyjnej anteny pokojowej, przedstawiono na rys. 36, a jej schemat elektryczny — na rys. 37. Pod względem konstrukcyjnym antena ta stanowi kombinację dwóch oddzielnych anten (kanału I i III), których wyprowadzenia podłączone są bądź do styków przełącznika, bądź do dwóch wtórników katodowych. Przełączenie wtórników katodowych odbywa się przez wyłączenie zasilania.

Antena dla I kanału składa się z dwóch równolegle ustawionych i indukcyjne z sobą sprzężonych anten ferrytowych. Każdą parę anten dostraja się kondensatorem strojeniowym C_1 (C_2) za pomocą Q-metru do częstotliwości 52,5 MHz. Współczynnik indukcji wzajemnej M między parami anten dobiera się doświadczalnie przez zmianę odległości między prętami, która zazwyczaj nie przekracza 4 cm.

Antenę dla III kanału wykonuje się w prostszym układzie jako jeden obwód. Wynika to z większej częstotliwości dostrojenia (f = 76 MHz) i jest podyktowane względami konstrukcyjnymi.

Dla anten I kanału stosuje się pręty ferrytowe o przenikalności $\mu_0 = 20$ (typ F-20). Wymiary prętów mogą być rozmaite (w opisanym wariancie wynoszą one dla obydwu anten: długość 100 mm, średnica 10 mm). Jako rdzenie dla anteny II kanału można stosować pręty ferrytowe o przenikalności 15. Rdzenie w omawianej tutaj antenie dla III kanału wykonano z dwóch połówek prętu ferrytowego F-20, złączonych przekładką polistyrenową (rys. 31c). Rdzeń ze szczeliną 1,5 mm zapewnia dobroć takiej anteny rzędu 40 przy f_0 = 73 MHz.

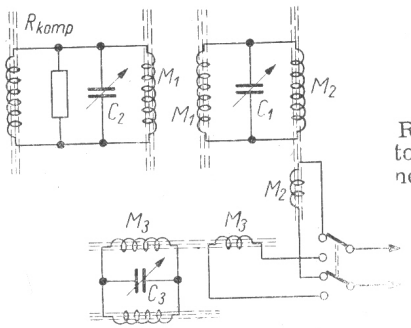
Cewki antenowe dla I kanału są nawinięte na cylindrycznym korpusie ze szkła organicznego o długości 40 mm i mają średnicę wewnętrzną 10 mm, a zewnętrzną 13 mm. Liczą one po $14 \div 15$ zwojów przewodu emaliowanego (o trwałym lakierze) o średnicy $0{,}15 \div 0{,}3$ mm i są nawinięte ze skokiem równomiernie narastającym poczynając od środkowej części cewki (skok 1 mm) aż do do jej końców (skok 5 mm). Zwoje ułożone są w bruzdach o głębokości do 0,5 mm, wyżłobionych w korpusie pilnikiem trójkątnym, a końce przewodu umocowane nitką na krawędziach korpusu.

Cewki antenowe III kanału wykonane są w sposób analogiczny, z tym zastrzeżeniem, że liczba ich zwojów wynosi 8 — 10. Poszczególne elementy wspornika są ściągnięte za pomocą czterech śrub umieszczonych w rogach i przechodzących przez wszystkie cztery płyty wspornika.

Kondensatory strojeniowe obwodów antenowych mogą być umocowane na wewnętrznych płytach wspornika; należy wówczas w zewnętrznych płytach zrobić otwory przelotowe umożliwiające strojenie obwodów. Pojemność kondensatorów strojeniowych ($2 \div 7$ pF) można w razie konieczności zmniejszyć; w tym celu z kondensatorem strojeniowym łączy się w szereg kondensatory o stałej pojemności.

Bardziej skomplikowanym problemem przy konstruowaniu telewizyjnej anteny ferrytowej jest wybór układu jej przyłączenia. W prostej antenie przedstawionej na rys. 37 anteny sprzężone

są z lampami wejściowymi za pomocą zwojów sprzężenia o końcówkach wyprowadzonych do bębna przełącznika kanałów. Zwoje sprzężenia są bezpośrednio nawinięte na jeden z prętów anteny, w liczbie $5 \div 6$ dla I kanału i $3 \div 4$ dla III kanału. Wadą tego układu jest konieczność przeróbki wejścia odbiornika telewizyjnego; wynika ona stąd, że zwoje sprzężenia powinny być podłączone bezpośrednio do siatki lampy wejściowej. Należy przy tym antenę umieścić bezpośrednio w pobliżu lampy wejściowej, a więc wewnątrz telewizora. Przyłączenie do jednego ze sprzężonych ob-



Rys. 37. Schemat ferrytowej anteny telewizyjnej uwidocznionej na rys. 36

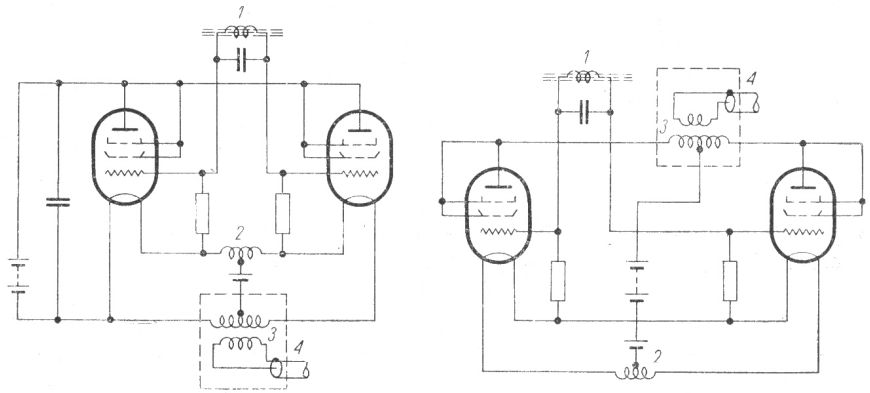
wodów antenowych pojemności i oporności przewodów montażowych oraz wejścia lampy zmienia jego parametry. Wobec tego w drugim obwodzie, nie sprzężonym z lampą, powinny być zastosowane elementy kompensujące w postaci dodatkowego opornika R_{komp} oraz kondensatora C o dobranych doświadczalnie wartościach.

Bardziej dogodna w użyciu, ale też i bardziej złożona w budowie jest antena z wtórnikami lub wzmacniaczami antenowymi. Zaletą tej anteny jest możliwość przyłączenia jej za pomocą kabla współosiowego do typowego, niesymetrycznego wejścia telewizora. Wadą wariantu lampowego jest konieczność zasilania wtórników katodowych. Schematy takich anten z lampami oszczędnościowymi typu 1Ж17Б uwidoczniono na rys. 38. Dla uproszczenia antenę poszczególnego kanału przedstawiono na rysunku w sposób umowny bez jej specyficznych cech. Kanały przełącza się przez przełączenie napięcia żarzenia lamp. Jak widać z rys. 38b — antena została tutaj włączona w układzie symetrycznym, i to właśnie zapewnia szereg zalet pod względem zwiększenia skuteczności anteny i polepszenia jej charakterystyki kierunkowej. Zastosowany transformator — rys. 38a — będzie opisany w punkcie 5. Źródło zasilania wtórników katodowych można umieścić zarówno w telewizorze, jak i bezpośrednio pod anteną.

Jak wiadomo, większość radzieckich stacji telewizyjnych wypromieniowuje fale spolaryzowane poziomo; dla odbioru takich

fal anteny ferrytowe należy ustawiać pionowo. Wewnątrz pomieszczeń pole elektromagnetyczne ma polaryzację zarówno pionową, jak i poziomą, wobec czego odpowiednie położenie anteny ferrytowej należy dobrać doświadczalnie orientując się według jakości odbioru. Trzeba mieć na względzie, że charakterystyka kierunkowa anteny ferrytowej przy odbiorze fal polaryzowanych poziomo jest kołowa (antena anizotropowa).

Zwarcie skonstruowaną antenę ferrytową, w której zastosowano wtórniki katodowe, można swobodnie ustawić w pokoju,



Rys. 38. Schematy anten telewizyjnych: a) z wtórnikami katodowymi; b) ze wzmacniaczem antenowym: *1* — antena; *2* — dławik „zaporowy"; *3* — transformator; *4* — linia zasilająca

a w szczególności w szczelinie framugi okiennej, gdzie natężenie pola jest znaczne większe niż wewnątrz pokoju.

Doświadczalnie stwierdzono, że nawet najprostsza antena ferrytowa (bez wtórników katodowych) zapewnia zadowalający odbiór zarówno w samej Moskwie, jak i w odległości do 20 km od niej.

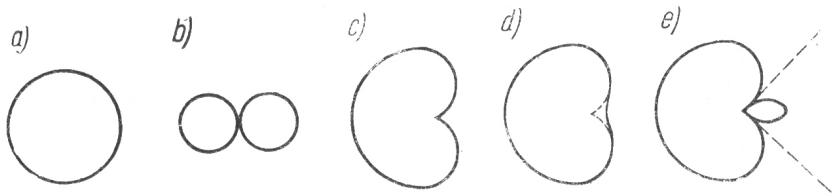
2. Antena odbiornika do „łowów na lisa"

Zawody krótkofalowców, znane pod nazwą „łowów na lisa", zdobywają coraz szerszą popularność wśród radioamatorów. Koncepcja zawodów polega na tym, aby w najkrótszym czasie znaleźć za pomocą odbiornika radiowego zamaskowany nadajnik.

W tych zawodach łączą się trafnie elementy sportowe (wytrzymałość fizyczna, umiejętność szybkiej orientacji i poruszania się w nieprzejrzystym terenie) z umiejętnością zmontowania ekonomicznego odbiornika o małych wymiarach i z anteną o dobrej charakterystyce kierunkowej. W konstrukcji takiej anteny jest

uwzględniona zazwyczaj najprostsza antena kierunkowa (ramka) i antena niekierunkowa (pionowy pręt). Jednak i w tym przypadku, dla uzyskania dużej czułości wymiary anteny muszą być wielokrotnie większe od wymiarów odbiornika. O wiele lepsze wyniki daje tu zastosowanie anteny ferrytowej. Łatwo też przy tym o jednokierunkowość anteny bez jakichkolwiek dodatkowych urządzeń konstrukcyjnych.

Rozpatrzmy bardziej szczegółowo, w jaki sposób można uzyskać jednokierunkową charakterystykę przy zastosowaniu anteny kom-



Rys. 39. Charakterystyka kierunkowa: a) anteny bezkierunkowej; b) ramki; c) kardioidy; d) charakterystyka prawie kardioidalna („rozmyta"); e) charakterystyka z dwoma minimami

binowanej (ramka i pręt). Wobec tego, że charakterystyka kierunkowa ramki ma kształt „ósemki" (rys. 39b), charakterystykę jednokierunkową, czyli kardioidę (rys. 39c), można uzyskać przy zsumowaniu obu sygnałów — od ramki i od pręta (rys. 39a), ale tylko wówczas, gdy ich SEM są równe, a fazy zgodne. Zgodność faz powinno się zrealizować sztucznie, gdyż zazwyczaj różnica ich wynosi $\frac{\pi}{2}$. Osiąga się równość amplitud przez zmianę długości pręta, a sztuczne przesunięcie fazowe — przez dobór sposobu sprzężenia obu anten (zazwyczaj stosuje się sprzężenie indukcyjne). Wadą wspomnianej anteny jest wąski zakres częstotliwości roboczych: stopień sprzężenia lub amplitudy sygnałów należy regulować na każdej z częstotliwości roboczych. W przeciwnym razie charakterystyka kierunkowa staje się „rozmyta" (rys. 39d) lub tworzą się dwa minima (rys. 39 e).

Zastosowanie anteny ferrytowej, umieszczonej dostatecznie blisko operatora, umożliwia wykorzystanie jego ciała jako „anteny" wtórnej, przy czym sprzężenie między obydwiema antenami — ferrytową i niekierunkową (ciałem operatora) — można łatwo regulować przez dobór odpowiedniej odległości między nimi. Najlepszą jednokierunkowość takiej anteny uzyskuje się w zakresie fal metrowych (10 ÷ 8 m).

Niżej zostanie opisana antena ferrytowa odbiornika przeznaczonego do „łowów na lisa" w zakresie 38 ÷ 40 MHz. Antenę montuje się z dwóch prętów z materiału F-20 o średnicy 12 mm i długości 150 mm. Cewki antenowe rdzeni nawinięte są na polistyrenowym korpusie ze skokiem narastającym tak jak w antenie telewizyjnej. Indukcyjność cewki wynosi ok. 2μH, liczba zwojów w każdej cewce 15 ÷ 16, a długość cewki — 35 mm. Jest celowe wykorzystanie w takim odbiorniku jako lampy wejściowej lamp typu 1Ж 17Б lub 1Ж 18Б, które mają małą pojemność wejściową i dużą oporność wejściową. Antenę ferrytową przyłącza się według układu sprzężenia pojemnościowego — z kondensatorem sprzęgającym o małej pojemności (rzędu 5 ÷ 6 pF). Przewody montażowe powinny mieć minimalną długość, nie większą niż 20 ÷ 30 mm od anteny do siatki lampy. Pożądane jest, by wymiary odbiornika były małe. Zazwyczaj zawiesza go operator na piersiach za pomocą pasków.

Oto kilka pożytecznych rad przy wykorzystaniu takiej anteny. Jak już stwierdzono charakterystykę kierunkową reguluje się przez zmianę odległości między ciałem operatora i anteną. Najlepszą charakterystykę obranej anteny można uzyskać w odległości 7 ÷ 8 cm od ciała operatora. Należy mieć na względzie, że przy zbliżeniu się do nadajnika siła sygnału, nawet w kierunku minimalnego odbioru charakterystyki kierunkowej (tzn. gdy operator jest zwrócony tyłem do obiektu poszukiwań), tak wzrasta, że staje się trudne odróżnienie maksimum od minimum. Aby ułatwić pracę operatora w takich warunkach celowe jest zmniejszenie czułości odbiornika na pewien czas. Łatwo to zrobić, zmniejszając napięcie anodowe wzmacniaczy pośredniej częstotliwości.

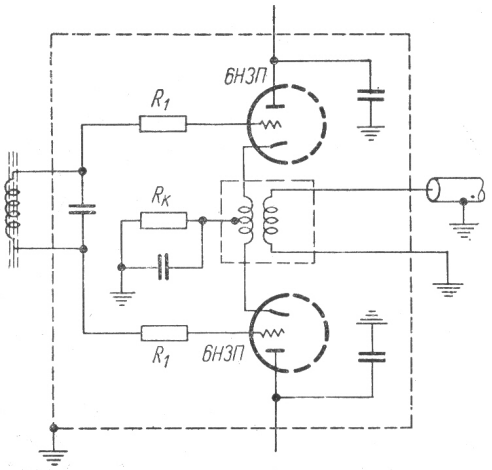
Pewne trudności powstają przy użyciu odbiornika w lesie, zwłaszcza gdy drzewa mają grube pnie i oddalone są od siebie o 3 ÷ 5 m. Pole fal elektromagnetycznych ma wtedy charakter interferencyjny. Przejawia się to zarówno w zmianie amplitudy sygnału, jak i w zmianie kierunku na nadajnik, określanego za pomocą odbiornika. W szczególności, jeśli grube drzewo znajduje się z prawej strony operatora (w odległości do 3 ÷ 4 m), to również kierunek przychodzenia fal odchyli się w prawo, a jeśli drzewo znajduje się z tyłu, to minimum charakterystyki kierunkowej „stępi się". Dla dokładniejszego określania kierunku zaleca się korzystać z terenu otwartego — przesiek i polan i po obraniu punktu orientacyjnego lub określeniu azymutu nadajnika, przesuwać się do następnego otwartego miejsca w terenie.

3. Antena ferrytowa do określania kierunku rozprzestrzeniania się fal radiowych

W dotychczasowym opisie rozmaitych urządzeń antenowych z ferrytami i wzmiankach o ich charakterystyce kierunkowej

główna uwaga był zwrócona na skuteczność anteny. Sama kierunkowość anteny była natomiast czynnikiem raczej drugorzędnym.

W szeregu jednak przypadkach kierunkowość anteny jest zagadnieniem podstawowym i wtedy konieczne się staje zastosowanie anteny ferrytowej. Dokładne określenie kierunku przychodzenia fal radiowych i znajomość azymutu nadajnika to rzecz bardzo ważna w nawigacji morskiej i lotniczej, przy lotach w warunkach złej widoczności itd. Otwarta przez sputniki era lotów kosmicznych zwiększa jeszcze bardziej zainteresowanie radionawigacją. Miliony ludzi na całym świecie z zachwytem obserwowały naocznie ruch sputników. Zastosowanie radiowych obserwacji i dokładne określanie kierunku przychodzenia fal radiowych wy-



Rys. 40. Schemat anteny ferrytowej do określania kierunku przychodzenia ultrakrótkich fal radiowych

promieniowanych ze sputników rozszerza zakres badań naukowych i może dostarczyć cennych informacji o torze ruchu sputników, o warunkach rozprzestrzeniania się fal radiowych itd.

Opiszemy teraz najprostszą antenę ferrytową do określania kierunku przychodzenia fal (azymutu) w zakresie częstotliwości 40 MHz. W takiej antenie należy zastosować specjalne środki zapobiegające zniekształceniu charakterystyki kierunkowej, jak również wpływowi ciała operatora ze względu na „zjawisko antenowe". Przez pojęcie „zjawiska antenowego" rozumie się zazwyczaj brak pełnej symetrii anteny, powodujący błędy przy pomiarze azymutu oraz „rozmycie zera" charakterystyki kierunkowej, co również pogarsza wyniki pracy urządzenia.

Azymut nadajnika radiowego określa się przez ustawienie anteny na minimum odbioru sygnału. To położenie anteny względem kierunku południka magnetycznego odczytuje się w stopniach na specjalnej skali kątowej.

Na rys. 40 przedstawiono elektryczny schemat anteny. Obwód

antenowy — trzy cewki nawinięte na trzy równoległe rdzenie oraz kondensator strojeniowy — podłączony jest do wejścia przeciwsobnego wtórnika katodowego. W jego obwód katodowy podłączony jest transformator symetryzujący, który umożliwia przejście od układu kabla symetrycznego do niesymetrycznego. Konstrukcja transformatora będzie opisana dalej. Jako lampy w tym stopniu mogą być użyte trioda podwójna 6Н3П, albo lampa 13Ж 17Б. Kabel jest podłączony do niesymetrycznego wejścia zwykłego odbiornika. W obwód siatek triod wprowadzone są małe oporniki typu УлИ wartości kilku omów; ma to na celu zapobieżenie samowzbudzeniu.

Dla usunięcia zjawiska antenowego umieszcza się obwód antenowy wraz z lampami wejściowymi i transformatorem w ekranującej osłonie metalowej (blacha mosiężna) ze szczeliną wzdłuż całego ekranu, równoległą do prętów antenowych. Przy montażu urządzenia należy zapewnić maksymalne zablokowanie obwodów zasilania (żarzenia i anody) na wielkiej częstotliwości.

Obrotowe urządzenie anteny można wykonać z metalu, przy czym powinno ono zapewniać obrót o 200°. W urządzeniu tym należy ustawić ograniczniki zabezpieczające kabel przed skręceniem.

Przy wyborze rdzeni dla anteny trzeba mieć na względzie możliwość uzyskania jej maksymalnej skuteczności. Dobre wyniki daje antena z rdzeniami o średnicy 25 mm i o przenikalności $\mu_0 = 20$. Liczba zwojów cewek antenowych wynosi 12 przy skoku nawijania równym 10 mm.

4. Urządzenia symetryzujące dla anten telewizyjnych

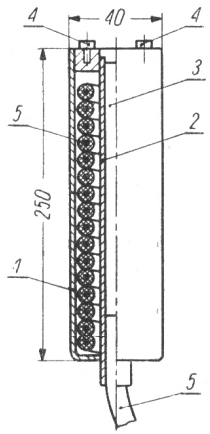
Najbardziej rozpowszechnionymi antenami telewizyjnymi są anteny symetryczne (dipol poziomy i jego modyfikacje). Wejście telewizorów jest zazwyczaj niesymetryczne, zatem dla sprzężenia anteny z telewizorem stosuje się przeważnie niesymetryczny kabel współosiowy. Przy bezpośrednim połączeniu takim kablem anteny symetrycznej z niesymetrycznym wejściem telewizora powstają straty energii i wielokrotne odbicia oraz zostaje osłabiona czułość urządzenia. Dla uniknięcia tych niepożądanych zjawisk stosuje się najprostsze urządzenie symetryzujące typu pętli U.

Doskonalszym symetryzatorem jest urządzenie z dławikiem „zaporowym". Jednak obydwa te urządzenia jako wąskozakresowe tracą i to w dużej mierze swe zalety przy rozstrojeniach przekraczających 5% częstotliwości podstawowej.

Przy zastosowaniu ferrytów nie trudno zbudować urządzenie symetryzujące, w którym można urzeczywistnić w sposób dość prosty przestrojenie w szerokim zakresie częstotliwości.

Na rys. 41 przedstawiono takie właśnie urządzenie w przekroju. Jak widać z rysunku, linia zasilająca (fider) ułożona jest spiralnie. W ten sposób osiąga się znaczne „skrócenie" wymiarów urządzenia.

Częstotliwość dostrojenia zależy od liczby zwojów i średnicy spirali. W urządzeniu bez ferrytu spirala z kabla PK-1 ma 13 zwojów, a jej średnica zewnętrzna jest równa wewnętrznej średnicy kubka (40 mm) wykonanego z rury duraluminiowej. Na górną pokrywę urządzenia, wykonanego z dielektryku dla wielkich częstotliwości (polistyren, szkło organiczne), wyprowadzone są zaciski żyły i powłoki linii zasilającej z przymocowanymi do nich końcówkami dipoli anteny. Dolna metalowa pokrywa (z mosiądzu) jest ściśle połączona z kubkiem, którego wysokość wynosi 250 mm. Przy zmniejszeniu zewnętrznej średnicy spirali do 25 mm i zwiększeniu liczby zwojów do 20 symetryzator można dostroić do częstotliwości 75 MHz.



Rys. 41. Urządzenie symetryzujące dla anten: telewizyjnych z zastosowaniem ferrytów: *1* — korpus; *2* — tuleja; *3* — pręt ferrytowy; *4* — miejsce umocowania połówek dipoli; *5* — linia zasilająca

Jeszcze doskonalszym i wygodniejszym w eksploatacji symetryzatorem jest urządzenie, w którym do przestrajania wykorzystuje się rdzeń ferrytowy, wprowadzony do wnętrza spirali. Umożliwia to dostrojenie urządzenia — bez zmiany wymiarów spirali — przez przesuwanie rdzenia za pomocą najprostszego mechanizmu. Do wnętrza spirali wprowadzona jest też tuleja, która ułatwia przesuwanie rdzenia. Jest nim pręt ferrytowy dla średniofalowej anteny (średnica 8 mm, długość 200 mm, $\mu_0 = 600$). Wprowadzenie rdzenia umożliwia płynne przestrajanie częstotliwości dostrojenia symetryzatora od 42 do 85 MHz.

Powyższe urządzenia były badane jako symetryzatory i w porównaniu ze zwykłą pętlą typu U dały lepsze wyniki, zwiększające ostrość obrazu.

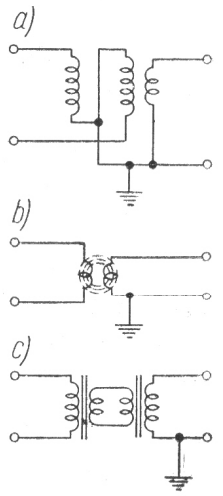
5. Transformatory antenowe z ferrytami

Jak już wspomniano, transformatory antenowe, stosowane do połączenia niesymetrycznego kabla do symetrycznej anteny, odgrywają dużą rolę w układach z antenami ferrytowymi. Są one przeznaczone nie tylko do transformowania oporności sprzęganych elementów, lecz również do zabezpieczenia przejścia od anteny symetrycznej do niesymetrycznego wejścia odbiornika.

Szczególne trudności powstają przy konstruowaniu transformatorów dla zakresu fal krótkich i ultrakrótkich, gdzie różnice pojemności pasożytniczych części cewki powodują naruszenie symetrii anteny. W wyniku tego powstają zjawiska antenowe, „rozmycie zera" charakterystyki kierunkowej itd.

Najprostszym transformatorem antenowym jest transformator „powietrzny" (bez rdzenia), który wskutek dużej indukcyjności rozproszenia pokrywa mały zakres częstotliwości (rys. 42 a). O wiele lepszy — jest transformator antenowy z cewkami osadzonymi na pierścieniu ferrytowym (rys. 42 b), a jeszcze doskonalszym — transformator z pętlą indukcyjną.

Stosowanie transformatora z pętlą indukcyjną zapewnia znaczne zmniejszenie indukcyjności rozproszenia, a tym samym zwiększenie roboczego zakresu częstotliwości. Poza tym tego rodzaju transformator odznacza się dużą symetrią, gdyż sprzężenie pojemnościowe między jego cewkami sprowadzone jest do minimum.



Rys. 42. Symetryzujące transformatory antenowe: a) powietrzny wykonany według układu W. D. Kuzniecowa; b) pierścieniowy; c) z pętlą indukcyjną

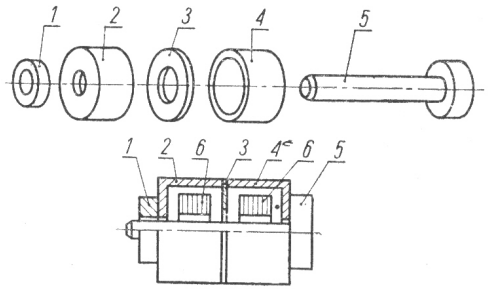
Na rys. 43 przedstawiono konstrukcję transformatora. Jak widać z równoważnego schematu transformatora (rys.42 c), sprzężenie między cewkami (pierwotną i wtórną) umieszczonymi na rdzeniach pierścieniowych z materiału magnetycznego o dużej przenikalności zrealizowane jest za pomocą przestrzennego transformatora utworzonego przez korpus ekranujący i sworzeń ściągający całą konstrukcję. Zarówno korpus transformatora, jak i sworzeń wykonane są z posrebrzonego mosiądzu.

Eksperymentalne zbadanie różnych konstrukcji udowodniło, że transformator antenowy z pętlą indukcyjną ma w porównaniu z innymi lepsze parametry.

Przy zastosowaniu ferrytowych rdzeni pierścieniowych o przenikalności rzędu setek Gs/Oe rozproszenie w tym transformatorze

zmniejsza się dzięki szczególnemu sposobowi nawinięcia cewek na pierścieniach (wiązka równoległych przewodów pokrywająca większą część powierzchni pierścieni toroidalnych) oraz silnemu sprzężeniu między cewkami i zwojem przestrzennym, co się osiąga przez specjalne ukształtowanie zwoju-ekranu, i co ma za zadanie przybliżyć ekran do cewek pierścieni toroidalnych.

Czynnikiem decydującym o rozszerzeniu zakresu częstotliwości transformatora antenowego jest należyty dobór magnetycznego materiału rdzenia. Badania osobliwości zachowania się materiałów magnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości wykazały, że



Rys. 43. Transformator z pętlą indukcyjną: *1* — nakrętka; *2*, *4* — czasze korpusu; *3* — dysk rozdzielający; *5* — sworzeń ściągający; *6* — pierścienie ferrytowe

poczynając od pewnej (granicznej) częstotliwości przenikalność magnetyczna materiału zaczyna się powoli zmniejszać w miarę wzrostu częstotliwości.

Praca w tym zakresie charakterystyki magnetycznej otwiera pewne perspektywy rozszerzenia roboczego zakresu częstotliwości urządzenia, gdyż przy tych częstotliwościach oporność pozorna będzie się zmieniała nieznacznie w miarę wzrostu częstotliwości. Tymczasem jednak w znanych dotychczas urządzeniach nie wykorzystuje się tej właściwości ferrytów, oczywiście z powodu wielkich strat towarzyszących przejściu w ten zakres częstotliwości. Co więcej, zazwyczaj uważano, że częstotliwość, powyżej której przenikalność magnetyczna zaczyna maleć, jest ostateczną granicą zakresu roboczego dla danego typu materiału. Dzięki doborowi dla transformatora antenowego ferrytów o odpowiedniej przenikalności możliwe jest rozszerzenie jego roboczego zakresu częstotliwości.

Wymiary transformatora antenowego, w którym wykorzystuje się tę zasadę, obiera się w zależności od rozmiarów posiadanych pierścieni ferrytowych oraz odpowiednio do samej konstrukcji.

Jak wskazuje praktyka, najlepiej działają transformatory ze

szczeliną $1 \div 2$ mm między pierścieniami a korpusem transformatora. W celu zmniejszenia sprzężenia pojemnościowego między pierścieniami ustawia się ekran elektrostatyczny w postaci dysku z otworem, którego średnica przekracza nieco średnicę ściągającego sworznia.

Dobre wyniki w zakresie ultrakrótkofalowym ($30 \div 70$ MHz) daje transformator z pierścieniami z ferrytu F-100 o średnicy zewnętrznej 11 mm, a wewnętrznej 6 mm i szerokości pierścienia 5 mm. Liczba zwojów w cewkach transformatora powinna zawierać się w granicach od 10 do 20 (zależnie od zakresu i przeznaczenia transformatora może się ona zmieniać). Wymiary korpusu są następujące: średnica zewnętrzna — 15 mm, wewnętrzna — 12 mm, średnica sworznia ściągającego — 5 mm. Korpus wykonuje się z mosiądzu, a jego powierzchnię pokrywa się srebrem.